



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento
2018

**Nuno Daniel de
Magalhães Fernandes**

**Caracterização Energética de Fotobiorreatores e sua
Potencial Otimização**



**Nuno Daniel de
Magalhães Fernandes**

**Caracterização Energética de Fotobiorreatores e sua
Potencial Otimização**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof.^a Doutora Mara Teresa Da Silva Madaleno

Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, pela orientação, disponibilidade e acompanhamento essencial para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, por toda a orientação e acompanhamento dispensado ao longo do estágio extracurricular Galp21, servindo de base para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Miguel da Silva Oliveira, pelo apoio na realização do estudo de viabilidade de implementação do sistema fotovoltaico.

Ao Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, pelo apoio e disponibilização do software DesignBuilder.

Ao Eng.^o Manuel Filipe Carvalho Alves Pinheiro, por todo o apoio, orientação e ensinamentos ao longo do decorrer da realização deste trabalho.

A toda a equipa Algafarm pela camaradagem e ajuda nas mais diversas tarefas que foram realizadas ao longo deste trabalho.

Aos meus Pais, Irmão e Namorada por todo o apoio e motivação transmitida, fundamentais para a realização deste trabalho.

Por último, um obrigado a todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo desta etapa académica.

palavras-chave

Eficiência energética, Fotobiorreatores, Microalgas, Incidência solar.

resumo

O presente trabalho foi desenvolvido no contexto da análise energética e tentativa de otimização dos sistemas de produção de microalgas presentes na empresa Cimentos Maceira e Pataias, S.A. – Algafarm, Unidade Industrial de Produção de Microalgas, com o propósito de reduzir o consumo energético associado ao processo.

Para tal foram analisadas variáveis como caudal, perdas de carga, pressão, consumos energéticos e incidência solar, tendo sido executado um relacionamento de todos estes pontos tendo em conta todas as informações existentes sobre os equipamentos e circuitos em estudo, validando-se o estado em que os reatores se encontram a operar e sua conformidade com o que fora inicialmente idealizado.

Após a execução do diagnóstico geral da instalação, foram propostos três cenários de tentativa de eficiência energética:

O primeiro cenário estudado consistiu na retirada de uma das eletrobombas presentes no sistema, ficando este a operar com apenas duas bombas instaladas em paralelo. Este cenário mostrou-se energeticamente ineficiente, uma vez que resultaria em um aumento significativo nos consumos energéticos do processo.

O segundo cenário consistiu em um estudo de viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico de autoconsumo para alimentar os grupos de eletrobombas. A implementação desta melhoria apresentou resultados bastante positivos, mostrando-se como uma boa solução ao problema em estudo.

Uma vez que ao nível dos equipamentos hidráulicos instalados não foi possível encontrar formas de redução nos consumos, o terceiro cenário passou pela análise da incidência solar na zona fótica do sistema e avaliação do impacto que alterações ao nível geométrico teriam na produtividade do sistema e consumo energético, verificando-se uma melhoria significativa no indicador energético específico através das configurações propostas.

keywords

Energy efficiency, Photobioreactors, Microalgae, Solar incidence.

abstract

The present work reports the energy analysis and attempt to optimize the microalgae production systems present in the company Cimentos Maceira and Pataias, S.A. - Algafarm, Industrial Unit of Microalgae Production, with the purpose of reducing the energy consumption associated with the process.

For this purpose, variables such as flow, pressure losses, pressure, energy consumption and solar incidence were analyzed, and a relationship was made of all these points taking into account all the information about the equipments and circuits under study, validating the state in that the reactors are operating and their conformity with what was initially idealized.

After performing the general diagnosis of the installation, three scenarios of attempted improved energy efficiency were proposed:

The first scenario studied consisted in the removal of one of the electropumps present in the system, operating with only two pumps installed in parallel. This scenario was energetically inefficient, since it would result in a significant increase in the energy consumptions of the process.

The second scenario consisted in a feasibility study of the implementation of a photovoltaic system for self-consumption to power the groups of electropumps. The implementation of this improvement presented very positive results, proving to be a good solution to the problem under study.

Since in the installed hydraulic equipment it was not possible to find ways to reduce consumption, the third scenario was the analysis of the solar incidence in the photic zone of the system and evaluation of the impact that changes at the geometric level would have on the system productivity and energy consumption, resulting in a significant improvement in the specific energy indicator through the proposed configurations.

Índice

Índice	xiii
Índice de figuras	xv
Lista de símbolos e abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Principais fatores que influenciam o crescimento biológico	4
2.1.1 Temperatura	5
2.1.2 Tipo de luz e Incidência	5
2.1.2.1 Luz solar e espectro de radiação.....	9
2.2 Fotobiorreatores.....	10
3 Metodologia	13
3.1 Descrição do caso de estudo.....	13
3.1.1 A empresa	13
3.1.2 Caso de estudo.....	15
3.2 Diagnóstico à instalação	19
3.2.1 Classificação do escoamento	19
3.2.2 Curva teórica de perdas de carga do sistema	20
3.2.2.1 Cálculo das perdas de carga distribuídas.....	21
3.2.2.2 Cálculo das perdas de carga localizadas	22
3.2.3 Medições de caudal.....	23
3.2.3.1 Características dos equipamentos utilizados	24
3.2.3.2 Descrição do processo experimental.....	26
3.2.4 Medições de pressão.....	29
3.2.5 Regime de operação das bombas	30
3.3 Estudo da incidência solar	31

3.3.1	Medições de radiação no interior do PBR	31
3.3.2	Modelo de aquisição de valores de radiação incidente	33
3.3.2.1	Cenários Propostos	35
3.4	Análise da cinética de crescimento da espécie	36
3.4.1	Relação entre a temperatura e a radiação incidente	38
3.4.2	Relação entre a temperatura e o crescimento	38
3.4.3	Relação entre a radiação e o crescimento	39
4	Resultados	41
4.1	Medições de caudal	41
4.2	Medições de pressão	43
4.3	Correlação entre medições de caudal, medições de pressão, pontos de operação das bombas e curva teórica do sistema.	43
4.4	Medição da variação da radiação incidente no interior do PBR	45
5	Estudo de cenários de otimização do sistema	47
5.1	Alteração do sistema para operação com duas bombas em paralelo	47
5.2	Estudo de viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico de autoconsumo.....	49
5.3	Alteração geométrica do sistema com vista à diminuição do sombreamento.	51
5.3.1	Variação da radiação incidente do interior do PBR.....	51
5.3.2	Modelos de previsão de crescimento e indicadores energéticos específicos	54
6	Conclusões	61
7	Referências	63
8	Anexos.....	67
8.1	Curvas características da bomba segundo o fabricante, variando a velocidade de operação.	67

Índice de figuras

Figura 1 – Representação das fases de crescimento e concentração de nutrientes em microalgas produzidas por batch.....	3
Figura 2 -Exemplo de uma relação típica entre a intensidade luminosa e a taxa fotossintética.	6
Figura 3 - Estimativa da área necessária para produção de microalgas de acordo com o valor de eficiência fotossintética.	7
Figura 4 - Variação de taxa específica de fotossíntese em função da densidade do fluxo de fótons.	9
Figura 5 - Representação esquemática de um Raceway	10
Figura 6 - Vista lateral e frontal de um PBR do tipo Flat Panel.	11
Figura 7 - Fluxograma produtivo.	14
Figura 8 - Representação isométrica de um PBR do tipo L.	15
Figura 9 - Volume de controlo de um fotobiorreator do tipo L.	16
Figura 10 - Coletor de distribuição.	16
Figura 11 - Coletor de entrada.	16
Figura 12 - Saída para a zona fótica.	17
Figura 13 - Zona fótica.	17
Figura 14 - Coletores de convergência “I”.	17
Figura 15 - Conduta de união de escoamentos e retorno ao depósito.....	17
Figura 16 - Análise dinâmica do comportamento do fluido no coletor de distribuição.	18
Figura 17 - Gráfico de variação do número de Reynolds ao longo do circuito.	20
Figura 18 - Gráfico de perdas de carga acumuladas para um caudal de 426 m ³ /h.	22
Figura 19 - Curva teórica das perdas de carga do sistema.	23

Figura 20 - Caudalímetro por ultrassons DXN da Dynasonics, utilizando transdutores de tempo de trânsito DTTN.	24
Figura 21 - Transdutores de TT: Esquema de identificação de elementos.....	25
Figura 22 - Tipos de montagem dos transdutores (Ficha Técnica – Caudalímetro DXN).....	25
Figura 23 - Instalação em modo híbrido à saída da bomba.....	28
Figura 24 - Instalação dos transdutores TT na zona fótica.....	29
Figura 25 - Instalação de manómetro na compressão da bomba.....	30
Figura 26 - Light Meter ULM 500.....	31
Figura 27 - Representação dos locais de medição de radiação no PBR.....	32
Figura 28 - Representação 3D no DesignBuilder para simulação da radiação incidente na linha 22.....	34
Figura 29 - Variação da radiação incidente na linha 22 ao longo do dia em estudo. Resultados obtidos através da simulação para um dia típico de Julho.....	34
Figura 30 - Renderização das diferentes trajetórias solares ao longo do ano.	35
Figura 31 - Representação simplificada da configuração do Cenário Base.	36
Figura 32 - Representação simplificada da configuração do Cenário A.	36
Figura 33 - Representação simplificada da configuração do Cenário B.	36
Figura 34 - Representação simplificada da configuração do Cenário C.	36
Figura 35 - Relação entre a turbidez e o peso seco do PBR.....	37
Figura 36 - Variação da temperatura no interior do PBR com a radiação solar incidente.	38
Figura 37 - Influência da temperatura do PBR na taxa específica de crescimento.	39
Figura 38 - Variação da taxa específica de crescimento com a radiação incidente média diária.	40
Figura 39 - Gráfico com a variação de pressão obtida através das medições efetuadas do reator.....	43

Figura 40 - Gráfico com a curva do sistema com a aplicação do fator geométrico.	44
Figura 41 - Gráfico da variação da radiação ao longo do PBR L8 - Dia 28/06/2018, entre as 13h e 17h.	45
Figura 42 - Comparação de consumos para o dia 1 de janeiro de 2016.....	47
Figura 43 - Comparação de consumos para o dia 13 de junho de 2016.....	48
Figura 44 - Perfil típico de consumos para um dia de verão em operação contínua durante o dia a 90% e 5 minutos a cada hora durante o período noturno.....	49
Figura 45 - Consumo mensal de todos PBRs para o ano de 2016.	49
Figura 46 - Previsão anual de rendimento da instalação com consumo.	51
Figura 47 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Julho.	52
Figura 48 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Abril.	53
Figura 49 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Dezembro.....	53
Figura 50 - Variação da radiação média diária ao longo do PBR.....	54
Figura 51 - Indicadores específicos de consumo energético obtidos através a equação de previsão de crescimento proposta por Jassby et al., 1976.	57
Figura 52 - Indicadores específicos de consumo energético obtidos através da equação (15) de previsão de crescimento.	58

Lista de símbolos e abreviaturas

g	Aceleração da gravidade	m s^{-2}
θ	Ângulo de propagação	$^{\circ}$
θ_T	Ângulo do feixe do transmissor	$^{\circ}$
k	Coeficiente de perda de carga	-
a_x	Coeficiente médio de absorção	$\text{m}^2 \text{mol}_x^{-1}$
ρ	Densidade do fluido	kg m^{-3}
I_{ph}	Densidade do fluxo de fótons	$\text{mol}_s \text{mol}_x^{-1} \text{s}^{-1}$
PFD	Densidade do fluxo de fótons	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
D	Diâmetro do interior da tubagem	m
f	Fator de atrito	-
f_t	Frequência transmitida	Hz
Re	Número de Reynolds	-
h_f	Perda de carga	m. c. a.
h_{fn}	Perdas de carga distribuídas	m. c. a.
h_{fl}	Perdas de carga localizadas	m. c. a.
PS	Peso Seco	g L^{-1}
$\frac{Y_x}{s}$	Produção de biomassa por mol de açúcar consumido	$\text{mol}_x \text{mol}_s^{-1}$
$\frac{Y_s^c}{ph, m}$	Produtividade máxima de açúcar por fóton	$\text{mol}_s \text{mol}_{ph}^{-1}$
PAR	Radiação ativa fotossintética	-
m_s	Requisitos mínimos de açúcar	$\text{mol}_s \text{mol}_x^{-1} \text{s}^{-1}$
$\frac{e}{d}$	Rugosidade relativa	-

q_s^c	Taxa específica fotossintética	$mol_s mol_x^{-1} s^{-1}$
$q_{s,m}^c$	Taxa específica fotossintética máxima	$mol_s mol_x^{-1} s^{-1}$
M	Tempo de propagação	s
T_{down}	Tempo de propagação em sentido contrário ao escoamento	s
T_{up}	Tempo de propagação na mesma direção do escoamento	s
Δ_T	Variação de frequência	Hz
C_0	Velocidade de propagação do som através do fluido em condições estáticas	$m s^{-1}$
V_s	Velocidade de propagação do som no fluído	$m s^{-1}$
V_T	Velocidade de propagação do som no material	$m s^{-1}$
V_f	Velocidade do escoamento	$m s^{-1}$
V	Velocidade média do fluido	$m s^{-1}$
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$kg m^{-1} s^{-1}$

1 Introdução

Nos dias que correm, a energia é essencial e utiliza-se de forma intensiva em qualquer atividade ou setor das sociedades modernas, seja na habitação, nos transportes ou na indústria.

Em Portugal, durante a primeira década do século XXI, foi registado um aumento considerável no consumo de eletricidade. De acordo com os dados apresentados pela Direção Geral de Energia e Geologia relativos ao ano de 2013, em Portugal registou-se um consumo de energia elétrica de 46 272 GWh, sendo o setor industrial responsável por 37% dos consumos registados nesse ano. Da energia produzida 40% teve origem por produção térmica fóssil estando intrínseca a emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera como o CO₂.

As microalgas são responsáveis por 50% da fixação de carbono orgânico no planeta, sendo considerado por vários autores como um dos mais promissores métodos para o combate ao aquecimento global (Vasumathi, Premalatha, & Subramanian, 2012). Estes organismos apresentam uma capacidade de fixação de carbono 28 vezes superior em relação à maioria das árvores, consumindo 2,75 vezes menos água no processo (Vasumathi et al., 2012).

Além da fixação de poluentes, a produção de microalgas encontra especial interesse através da extração de moléculas de valor acrescentado como astaxantina, B-carotenos, Omega 3, vitamina E e vários pigmentos, muito utilizados nas indústrias alimentar e cosmética (Simionato, Basso, Giacometti, & Morosinotto, 2013). Assim, o cultivo de microalgas possui um vasto campo de aplicação traduzindo-se num produto de elevado valor comercial.

No sector de produção de microalgas em geral e na ALGAFARM em particular, existe uma especial atenção à sustentabilidade do processo o que leva a uma constante preocupação na utilização de equipamentos e sistemas eficientes, procurando-se continuamente a otimização das suas máquinas de produção com o intuito de tornar o processo o mais eficiente possível.

1.1 Objetivos

O trabalho proposto consiste na caracterização energética dos circuitos hidráulicos de produção de microalgas (fotobiorreatores) e na sua potencial otimização de forma a ser obtida uma redução do consumo energético associado ao processo. Para tal, serão analisadas variáveis como caudal, consumos energéticos, pressão, incidência solar e será feito um relacionamento de todos estes tendo em conta todas as informações existentes sobre os equipamentos e circuitos em estudo.

Com vista à otimização do sistema e redução nos consumos energéticos, serão estudados três cenários de tentativa de eficiência energética:

- Alteração do sistema original passando a operar com duas bombas em paralelo a rotações superiores em substituição das três bombas individuais.
- Viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico de autoconsumo.
- Alteração da configuração da zona fótica com vista ao aumento da incidência solar nas zonas inferiores e interiores dos reatores, através da diminuição de sombreamentos.

2 Estado da Arte

Microalgas são organismos procarióticos ou eucarióticos fotossintéticos de crescimento rápido devido à sua estrutura multicelular simples ou unicelular. Estima-se a existência de mais de 50 mil espécies destes microrganismos por todo o planeta, habitando não só em ambiente aquático como também terrestre (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

As microalgas contêm pigmentos fotossintéticos como a clorofila, responsáveis pela absorção da luz solar. Durante o fenómeno de fotossíntese, a energia contida na luz solar é convertida em energia química que pode ser armazenada sob a forma de amido e carboidratos. Atendendo às suas características intrínsecas, como o tipo de pigmento utilizado para a realização de fotossíntese, tipo de compostos de hidrocarbonatos produzidos e composição da sua parede celular, é possível agrupá-las como algas verdes, vermelhas, castanhas, azuis esverdeadas entre outras (S. P. Singh & Singh, 2015b).

O curso do crescimento de microalgas por *batch* apresenta tipicamente seis fases distintas. Na fase inicial “lag” (Figura 1 - 1), devido à presença de células inviáveis ou necessidade de adaptação a variações no ambiente de produção, é registado um atraso no crescimento das microalgas. Após esta fase inicial, os microrganismos entram numa fase exponencial de crescimento (Figura 1 – 2) onde não existe limitação por falta de nutrientes ou intensidade luminosa. Quando um determinado número de células é atingido, a intensidade luminosa e disponibilidade

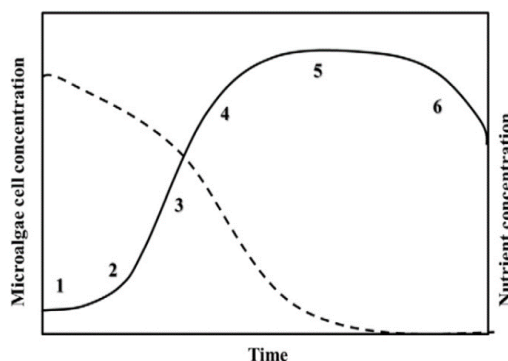


Figura 1 – Representação das fases de crescimento e concentração de nutrientes em microalgas produzidas por batch (Mata et al., 2010).

de nutrientes começam a ser fatores limitantes, abrandando o ritmo de crescimento (fase linear, Figura 1 – 3). Na fase de declínio (Figura 1 – 4) começa-se a registar uma diminuição na taxa de crescimento motivada pelos fatores limitantes. Eventualmente, com o esgotamento dos nutrientes presentes no meio e a intensificada limitação na intensidade luminosa, a taxa de crescimento atingirá um valor nulo denominado de fase estacionária (Figura 1 – 5). Chegando-se a esta fase, dá-se o armazenamento e acumulação de carbonos e lípidos. Na fase de morte (Figura 1 – 6), a concentração de células diminui de forma célere devido ao completo esgotamento dos nutrientes, sobreaquecimento, súbito despoletar de contaminações e elevadas variações no pH (Lee, Jalalizadeh, & Zhang, 2015).

A espécie de microalga em estudo é a *Chlorella Vulgaris*, que se caracteriza por ser uma alga de cor verde, de água doce e rápido crescimento. O facto de apresentar uma cor verde deve-se à presença dos pigmentos fotossintéticos clorofila a e b que lhe conferem uma sensibilidade superior para radiação com comprimentos de onda na gama do azul e vermelho (S. P. Singh & Singh, 2015b).

2.1 Principais fatores que influenciam o crescimento biológico

O crescimento de microalgas é influenciado por diversos fatores externos e internos ao reator. O tipo de fonte de luz utilizado, intensidade de incidência, fotoperíodo, temperatura a que a cultura se encontra, concentração de nutrientes, presença de O₂, disponibilidade de CO₂ e pH são fatores de extrema importância no crescimento em regime autotrófico. Desta forma, é essencial a sua correlação de forma a operar no ponto ótimo de crescimento da espécie em causa (Mata et al., 2010).

Além dos fatores não biológicos, existem fatores de cariz biológico como a presença de elementos patogénicos ou competitivos que terão elevada relevância na taxa de crescimento das microalgas.

Dependendo da configuração do reator e quantidade de radiação a que está exposto, também a concentração a que a cultura se encontra tem um elevado impacto na produtividade do reator. Em sistemas de operação em contínuo, mantendo a concentração da biomassa no nível ótimo para a espécie em produção,

é possível obter uma eficiência superior na utilização da radiação uma vez que o nível exposição de cada célula se torna mais homogêneo (Vonshak, Abeliovich, Boussiba, Arad, & Richmond, 1982).

2.1.1 Temperatura

Na literatura, existe consenso em referir a temperatura como sendo um dos fatores com maior importância no crescimento das microalgas (Bernard & Rémond, 2012)(Mata et al., 2010). Embora ainda não haja muita informação relativamente à amplitude do efeito da temperatura em sistemas de produção em ambiente exterior, estão amplamente documentados os efeitos à escala laboratorial em múltiplas espécies de microalgas (Singh & Singh, 2015).

Na generalidade, o crescimento das microalgas acontece a uma gama de temperaturas consideradas entre os 5°C e 40°C. No entanto, dependendo da espécie de microalga em análise e considerando a temperatura como o único fator limitante para o crescimento, a taxa de crescimento varia consoante a temperatura a que a cultura se encontra existindo um valor ótimo de operação para a temperatura a que a cultura se deve encontrar. A taxa de crescimento aumenta com o aumento de temperatura até a um determinado valor ótimo, todavia, após ultrapassado este valor a taxa de crescimento decresce abruptamente podendo resultar na perda total da cultura (Bernard & Rémond, 2012) (S. P. Singh & Singh, 2015a).

2.1.2 Tipo de luz e Incidência

Uma vez que as microalgas se tratam de organismos fotossintéticos, a disponibilidade de radiação solar (ou outra fonte luminosa) é crucial para o seu crescimento. É comum na literatura apresentar-se essa energia em densidade do fluxo de fótons (PFD – Photon Flux Density) em $\text{mmol/m}^2/\text{s}$, sendo a taxa fotossintética determinada através da média de PFD a que cada uma das células é exposta (Vasumathi et al., 2012).

Vários autores já comprovaram a influência que a radiação solar exerce sobre a taxa de crescimento. Nos casos estudados, é visível o aumento da taxa de

crescimento até a um determinado valor ótimo de irradiação média, decrescendo esta com a superação desse valor (Benson & Rusch, 2006).

Shilton Béchet e Guieysse apresentam-nos uma vasta compilação de modelos matemáticos comprovados capazes de descrever o efeito da Intensidade luminosa na taxa fotossintética dos microrganismos.

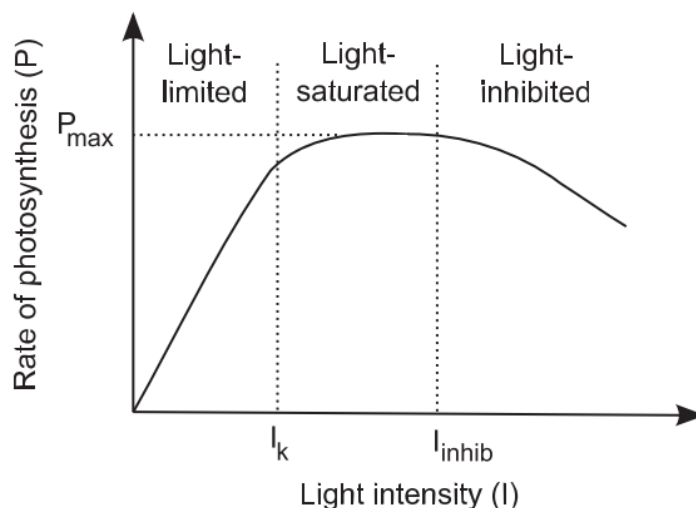


Figura 2 -Exemplo de uma relação típica entre a intensidade luminosa e a taxa fotossintética (Béchet et al., 2013).

Como podemos ver através da Figura 2, a curva típica de relação entre a intensidade luminosa e a taxa fotossintética pode ser dividida em três estados distintos, de acordo com a intensidade luminosa disponível: Estado de limitação luminosa, saturação e inibição.

Quando um sistema se encontra em estado de limitação luminosa, significará que este não estará a funcionar no ponto ótimo de radiação incidente de forma a proporcionar as maiores produtividades possíveis, porém Beardall e Morris (1976) demonstraram que um sistema que esteja a operar com intensidades luminosas superiores aos valores de saturação poderão, em determinadas circunstâncias, apresentar taxas fotossintéticas inferiores às de um sistema em limitação luminosa atribuindo a este efeito o nome de “hysteresis effect”(Béchet et al., 2013).

Este fenómeno de foto-inibição é principalmente observado em culturas produzidas no exterior, em que a partir de um determinado valor de incidência solar, o crescimento da biomassa começa a estabilizar. Assim, apesar da necessidade de

incidência solar, um elevado fluxo de fótons (PFD) pode resultar numa redução da capacidade fotossintética das células (Vasumathi et al., 2012).

Simionato, Basso, Giacometti, & Morosinotto, 2013, apresentam a importância de uma elevada eficiência de conversão da energia em biomassa, bem como a relação da mesma com a área necessária para produzir uma tonelada de biomassa por ano. Como podemos ver na Figura 3, para valores de eficiência fotossintética tão baixos como 0,1% a área necessária para produção é cerca de 100 vezes superior em comparação com a área necessária para valores de eficiência fotossintética de 3%. Seguindo esta linha de pensamento, para aplicações industriais em larga escala onde o custo de produção é um ponto fulcral, uma elevada eficiência fotossintética resultará em menores custos de operação e manutenção contribuindo para uma superior sustentabilidade energética e económica do processo.

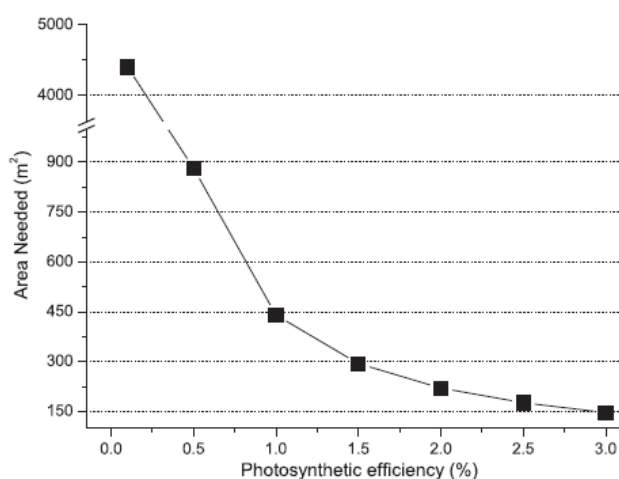


Figura 3 - Estimativa da área necessária para produção de microalgas de acordo com o valor de eficiência fotossintética (Simionato, Basso, Giacometti, & Morosinotto, 2013).

Além da quantidade de luz incidente, o crescimento pode ser influenciado por vários tipos de sombreamentos. Guo Li e Fu, em 2011, demonstraram com a introdução de elementos opacos a provocar sombreamento no sistema que estes se traduzem numa redução no crescimento da microalga em estudo.

Jalalizadeh Lee e Zhang, em 2015, publicaram uma compilação de um vasto número de modelos matemáticos eficazes na descrição do efeito da intensidade luminosa na taxa específica de crescimento de microalgas, organizando os modelos apresentados em três grupos distintos: Aqueles que consideram a variação de um

único substrato, os modelos que consideram a luz como o único fator variável e modelos híbridos considerando a variação da condição climática e a presença de um substrato.

Em 1976, Jassby and Platt propuseram um modelo matemático descrevendo a relação entre o crescimento biológico e a radiação incidente através da taxa de produção de açúcar no cloroplasto (q_s^c) em função da densidade do fluxo de fotões (I_{ph}).

$$q_s^c = q_{s,m}^c * \tanh\left(\frac{Y_{s,m}^c * a_x * I_{ph,\lambda}}{q_{s,m}^c}\right) \quad (mol_s mol_x^{-1} s^{-1}) \quad (1)$$

Em que: $q_{s,m}^c = 1,25 \times 10^{-4} \text{ mol}_s \text{ mol}_x^{-1} s^{-1}$; $Y_{s,m}^c = 0,1 \text{ mol}_s \text{ mol}_{ph}^{-1}$; $a_x = 3,5 \text{ m}^2 \text{ mol}_x^{-1}$; $m_s = 3,0 \times 10^{-6} \text{ mol}_s \text{ mol}_x^{-1}$; $Y_{x,s} = 0,625 \text{ mol}_x \text{ mol}_s^{-1}$ (Janssen, 2016).

Partindo de uma função tangente hiperbólica, este modelo é composto por um conjunto de parâmetros com significado biológico. Estes parâmetros foram definidos atendendo aos valores apresentados por Janssen, 2016, para *Chlorella* com elevada aclimação às condições de teste.

Como é possível aferir através da Figura 4, inicialmente a taxa específica de fotossíntese reage rapidamente ao aumento da densidade do fluxo de fotões, estabilizando e tornando-se relativamente constante no seu valor máximo ($q_{s,m}^c$) após ser atingido o valor de saturação da densidade do fluxo de fotões ($I_{ph,s}$) (Jassby et al., 1976).

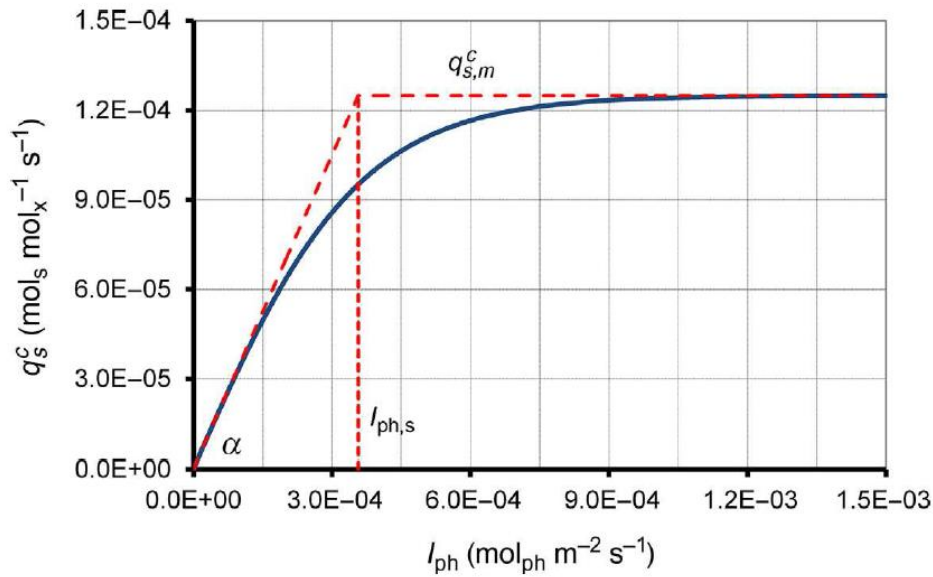


Figura 4 - Variação de taxa específica de fotossíntese em função da densidade do fluxo de fótons.

Neste modelo, é calculada inicialmente a taxa de produção de açúcar podendo esta ser convertida através da equação (2) em taxa específica de crescimento.

$$\mu = (q_s^c - m_s) * Y_{x/s} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

2.1.2.1 Luz solar e espectro de radiação

Em sistemas industriais de produção de microalgas em ambiente exterior, a luz solar é a fonte de energia utilizada nos processos fotossintéticos. Assim sendo, podemos considerar esta como sendo um dos principais fatores com crucial influência se não o de maior importância no crescimento das microalgas (Mata et al., 2010) (Lee et al., 2015).

Apesar do espectro da radiação que chega ao solo terrestre apresentar uma extensa gama de comprimentos de onda, apenas uma fração compreendida entre os 400 e 700 nm (luz visível), que representa aproximadamente 43% de toda a radiação incidente, pode ser efetivamente ser utilizada pelas microalgas. Denominando-se esta por radiação ativa fotossintética (PAR – Photosynthetic Active Radiation) (Vasumathi et al., 2012).

2.2 Fotobiorreatores

Define-se por fotobiorreator (PBR) o sistema responsável por fornecer as condições necessárias à ocorrência das reações biológicas indispensáveis para o cultivo de microalgas. Estes sistemas podem ser agrupados de acordo com as suas propriedades técnicas: Fermentadores, PBRs abertos (i.e., *Raceways*), PBRs fechados e fotobiorreatores de bio filme (Elrayies, 2018) (Mata et al., 2010).

A fermentação é uma das formas mais usuais de cultivo de microalgas à escala laboratorial. Em escalas maiores, os *Raceways* são os sistemas vulgarmente mais utilizados devido ao baixo investimento necessário e reduzidos custos de operação. O *design* mais usual deste tipo de reator consiste numa simples lagoa a céu aberto com uma parede divisória interior formando um circuito para circulação da cultura de microalgas (Figura 5). A movimentação da cultura de microalgas através do circuito é muitas vezes feita através da gravidade ou com a aplicação de uma *Paddle Wheel*. No entanto, estes sistemas de produção de microalgas a céu aberto apresentam vários problemas uma vez que estão mais propícios ao aparecimento de contaminações, fraca penetração da radiação solar, evaporação e elevada sensibilidade às condições climáticas, traduzindo-se em uma baixa eficiência de produção (Elrayies, 2018).

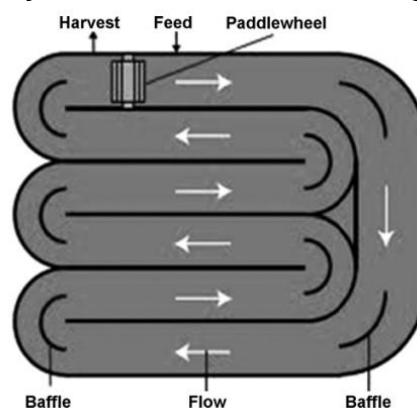


Figura 5 - Representação esquemática de um Raceway (R. N. Singh & Sharma, 2012).

Relativamente aos fotobiorreatores de bio filme as concentrações atingidas são tipicamente mais elevadas comparativamente com os *Raceways*. No entanto, apresentam os mesmos problemas no controlo da temperatura e aparecimento de contaminações (Elrayies, 2018).

Os fotobiorreatores em sistema fechado apresentam uma tentativa de colmatar as falhas de controlo observadas nos sistemas abertos. Estes sistemas permitem um maior controlo ao nível dos parâmetros fundamentais para o crescimento de microrganismos, podendo ser otimizados de acordo com as características da microalga que se deseja produzir (Mata et al., 2010). Uma vez que

são sistemas fechados, existe uma diminuição ou completo impedimento de contacto entre a cultura que circula no interior do PBR e a restante microbiota exterior, dificultando o aparecimento de contaminações. Os *designs* mais usuais para este tipo de fotobiorreator consistem na sua composição através de tubagens de secção redonda ou em painéis retangulares (Flat-Panel PBRs).

Os PBRs do tipo *Flat Panel* (Figura 6), consistem em recipientes transparentes planos com baixa espessura de forma a garantir uma elevada penetração da radiação solar. Em sistemas de cultivo no exterior, os painéis podem ser encontrados dispostos paralelamente na vertical ou com inclinação. Embora esta última configuração apresente ganhos ao nível da quantidade de radiação solar incidente, os custos associados a este tipo de estrutura potenciam a ampla utilização dos sistemas sem inclinação (Elrayies, 2018). Neste tipo de fotobiorreator a agitação da cultura é habitualmente feita por *air-lift*, em que as bolhas de arejamento e CO₂ injetadas provocam, com a sua ascensão, movimentação do fluido e mistura de nutrientes (Croze, Sardina, Ahmed, Bees, & Brandt, 2013).

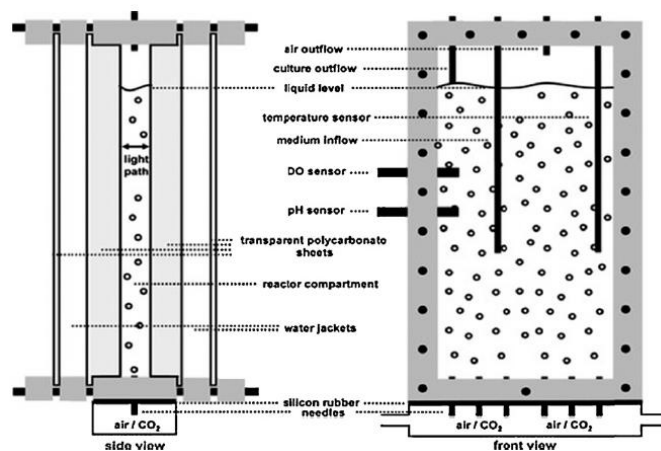


Figura 6 - Vista lateral e frontal de um PBR do tipo *Flat Panel* (R. N. Singh & Sharma, 2012).

Os PBRs tubulares fechados consistem em sistemas compostos por tubagens transparentes que se podem encontrar geralmente dispostos na vertical, horizontal ou em configuração helicoidal. Na conceção de um fotobiorreator tubular para produção em ambiente exterior, pretende-se um sistema com a maior exposição solar possível, capaz de distribuir essa energia por todas as células presentes garantindo que o máximo dessa energia recebida é utilizada para produção de

biomassa. Um sistema bem dimensionado deve garantir controlo sobre os parâmetros fundamentais de operação que influenciam o crescimento biológico, assim como atribuir ao fluido a agitação necessária com o menor consumo energético possível e o menor número de pontos de possível contaminação (Wang, Lan, & Horsman, 2012). Neste tipo de sistema tubular a agitação poderá ser feita com recurso a bombas centrífugas ou através de *air-lift*.

Elrayies afirma que em reatores com apenas uma linha de tubagens se atinge maiores valores de incidência solar, podendo este facto não ser benéfico para o crescimento celular uma vez as elevadas intensidades lumínicas podem gerar o fenómeno de foto-inibição anteriormente abordado. Este fenómeno pode ser suprimido através da adição de mais linhas ao sistema, diminuindo a radiação incidente nas linhas através da introdução de algum sombreamento. Assim, ao nível da radiação incidente, deverá ser bem ponderado o número de tubagens onde é feita a fotossíntese, fazendo com que o sistema não se encontre nem com excesso de radiação nem em privação da mesma.

3 Metodologia

3.1 Descrição do caso de estudo

3.1.1 A Empresa

Criada pelo grupo Secil junto à fábrica de produção de cimento Cibra-Pataias, a Algafarm possui mais de 300 km de tubagens de fotobiorreatores dedicadas à produção de microalgas, destinando-se a sua produção aos sectores alimentares (animal e humano) e indústria cosmética.

Seguindo um método de produção em *scale-up* (figura 7), a estirpe em produção é desenvolvida em laboratório até atingir níveis de concentração adequados para a admissão da cultura nos *Greenwalls* para posterior entrada nos Fotobiorreactores de produção onde será realizado o restante crescimento. No laboratório, serão inoculados sequencialmente balões de Erlenmeyer com 250 ml, 1L e 5L, respectivamente, sendo a ordem de inóculo possível de ser alterada de acordo com as circunstâncias de produção, quantidade de cultura e concentração. Esses balões de Erlenmeyer serão depois utilizados na inóculo dos Green-Wall's.

Os Green-Wall's são compostos por 12 painéis verticais em material polimérico, em que o volume de produção disponível é de 1000L. Estão dispostos por filas no interior de uma estufa com ambiente controlado e iluminação 24 horas por dia natural e artificial.

Durante a produção, são necessárias várias acções para controlo do estado dos fotobiorreatores tais como, controlo de nível, nutrientes, CO₂, presença de contaminações, etc. Actualmente, encontra-se em produção a espécie *Chlorella Vulgaris* em que é utilizado CO₂ industrial puro o que torna a biomassa final indicada para alimentação humana.

A cultura presente nos Green-Wall's, após atingir determinado grau de concentração, é utilizada para inocular um/os PBR's S, seguindo-se os M e por fim os L. Mais uma vez, a ordem de sequência de inoculação poderá ser alterada de acordo com a quantidade de biomassa disponível e sua concentração em g_{biomassa}/L.

Após o scale-up produtivo, a biomassa é colhida e em seguida processada de forma a aumentar a concentração de biomassa por extração de parte da água presente, sendo para isso utilizado um sistema de ultrafiltração por membranas. Este sistema permite para além de concentrar a biomassa até ao valor pretendido reaproveitar toda a água da extração para introdução novamente no processo. Após esta etapa, a biomassa poderá ser transformada em pó ou em pasta consoante o sistema de *downstream* utilizado – Secagem por Atomização para o pó ou Centrifugação para a pasta.

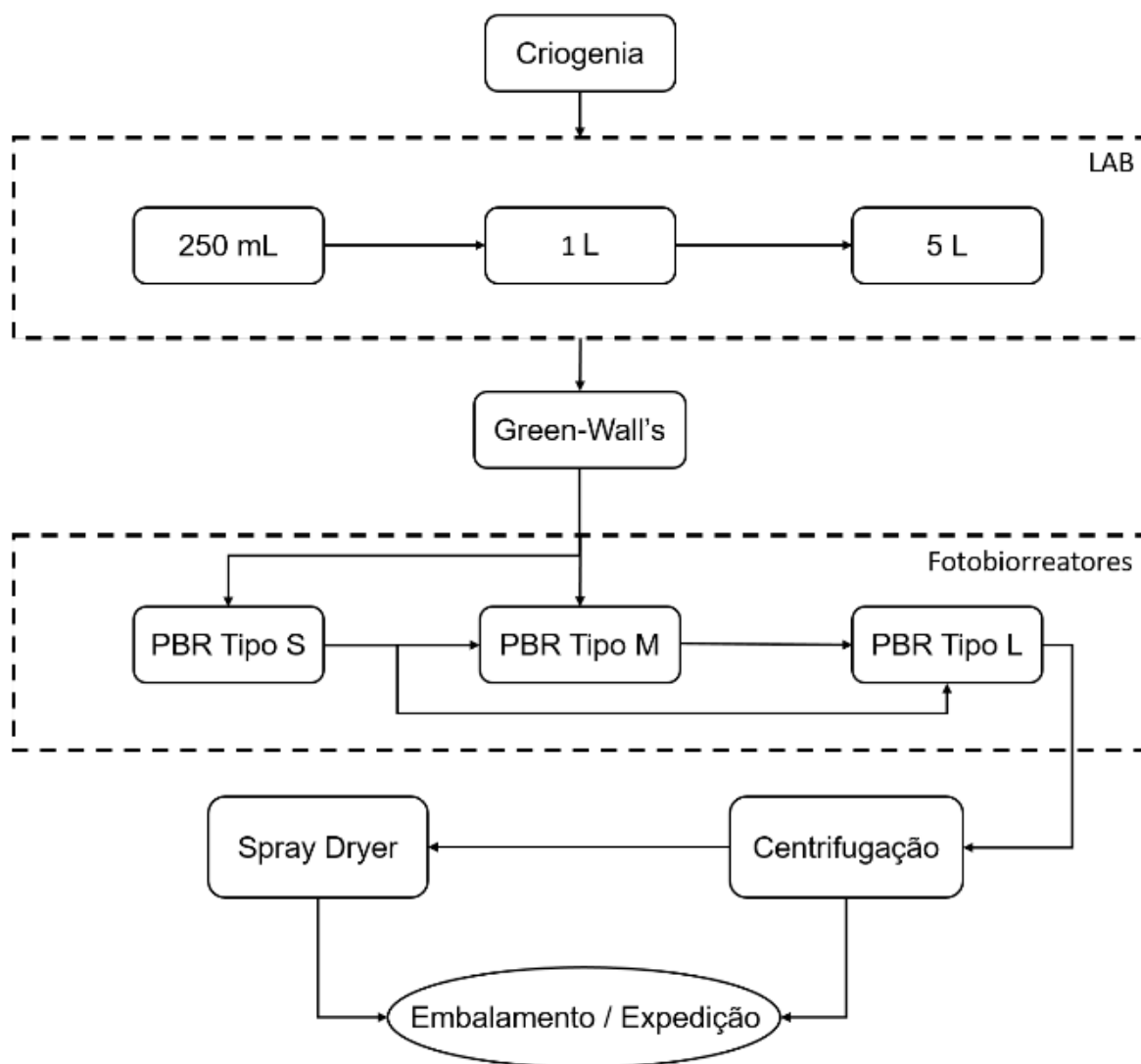


Figura 7 - Fluxograma produtivo.

3.1.2 Caso de estudo

Os Fotobiorreatores (PBR's) em estudo consistem em sistemas tubulares fechados para produção de microalgas. Os tubos da zona fótica são de polimetilmetacrilato (PMMA) transparente e incolor e estão dispostos na horizontal, espaçados entre si, de forma a maximizar os ganhos solares. Nestes sistemas, é necessário promover a movimentação do fluido dentro das tubagens para que esta possa circular entre a zona fótica e a zona escura. Para isto são utilizadas bombas centrífugas acopladas a um motor de indução com variação de velocidade através de um variador eletrónico de velocidade.

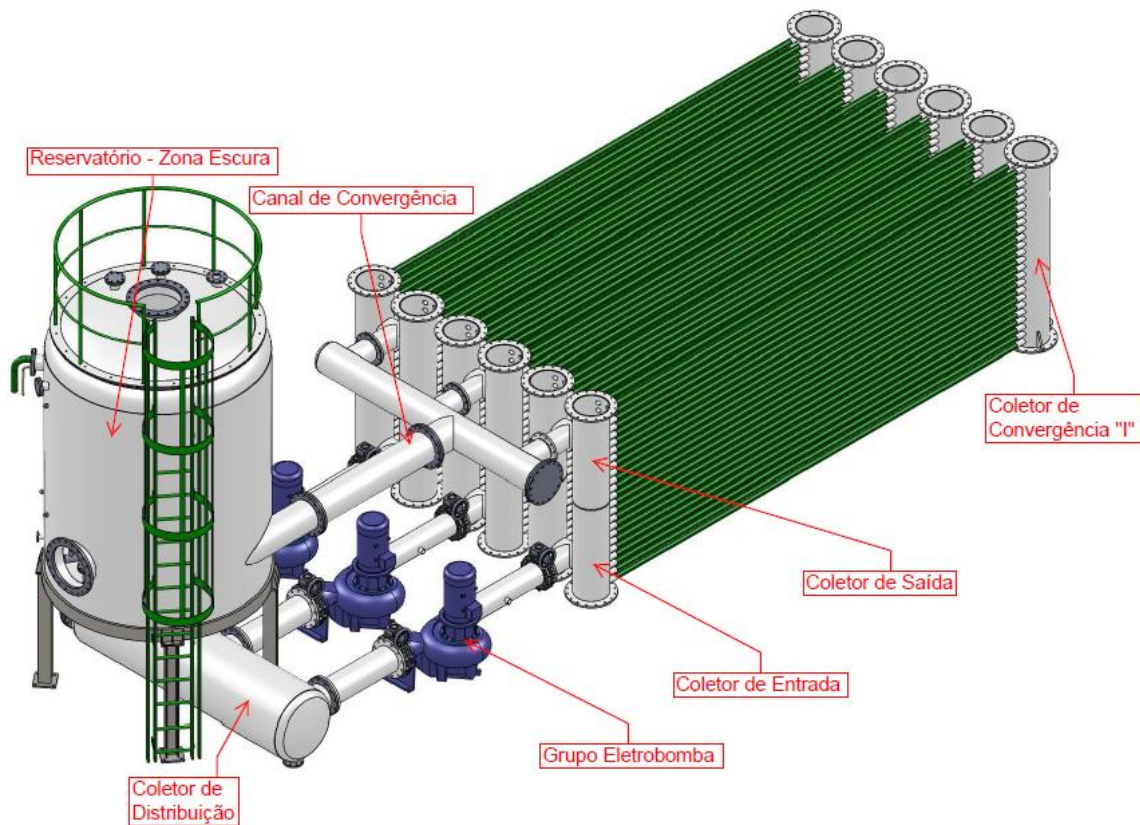


Figura 8 - Representação Isométrica de um PBR do tipo L.

Existem instalados quatro grupos de fotobiorreactores com tamanhos distintos: S, M, L e XL. Possuindo estes volumes de 10 m³, 35m³, 90m³ e 160m³, respetivamente.

Descrição de operação de um Fotobiorreator do tipo L:

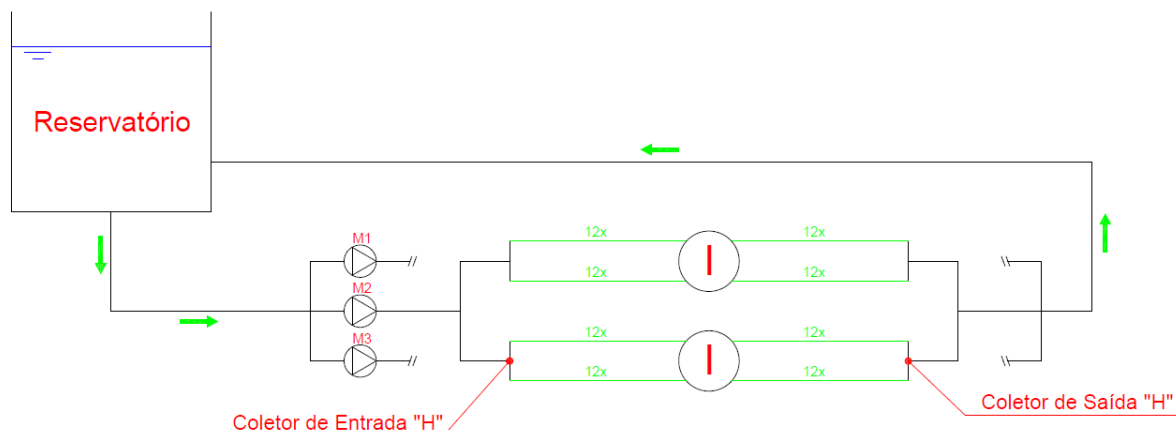


Figura 9 – Volume de Controlo de um fotobiorreator do tipo L.

O fluido circula do reservatório para o coletor de distribuição que está acoplado à admissão dos grupos Eletrobomba. Neste coletor será feita a distribuição do caudal por 3 circuitos paralelos (Figura 10), em que cada um conta com uma bomba centrífuga.

Após a compressão da bomba, o fluido dará entrada no Coletor de Entrada (ver Figura 11) através de uma derivação em “T” que divide e encaminha o fluido para os dois coletores verticais. Dentro desses coletores, existem 2x12 picagens (ver Figura 12) onde irá dar saída para os tubos da zona fótica do PBR. Essa secção do



Figura 10 - Coletor de distribuição.



Figura 11- Coletor de entrada.

sistema é composta por 8 tubos de 12 metros em PMMA unidos com recurso a compensadores para ajuste da contração, dilatação e vibrações do sistema.



Figura 12 - Saída para a zona fótica.



Figura 13 - Zona fótica.

Após percorrer os 96m, dará entrada nos coletores em “I” onde o fluido vai convergir e inverter a direção por um segundo conjunto de 2x12 tubos da parte superior. Depois o fluido irá dar entrada no coletor de saída. Os caudais provenientes dos três circuitos irão convergir (Figura 15) e dar entrada pela lateral do reservatório.



Figura 14 - Coletores de convergência “I”.



Figura 15 - Conduto de união de escoamentos e retorno ao depósito.

O dimensionamento e conceção dos elementos hidráulicos do circuito foi realizado com recurso a modelos computacionais de dinâmica de fluidos (CFD), onde a velocidade de escoamento em todas as tubagens do circuito teria uma variação nunca superior a 5%. Este aspeto é de especial interesse para a zona fótica onde a existência de tubagens com velocidades inferiores ao pretendido teria impactos ao nível da mistura e distribuição de nutrientes e formação de bio filmes nas superfícies das tubagens impedindo a penetração da radiação solar.

Na Figura 16 encontra-se representada a simulação em CFD realizada ao nível do coletor de distribuição onde foi estudado qual o posicionamento ótimo para as entradas e saídas do coletor, assim como respetivas dimensões de forma a manter caudais iguais em cada uma das linhas.

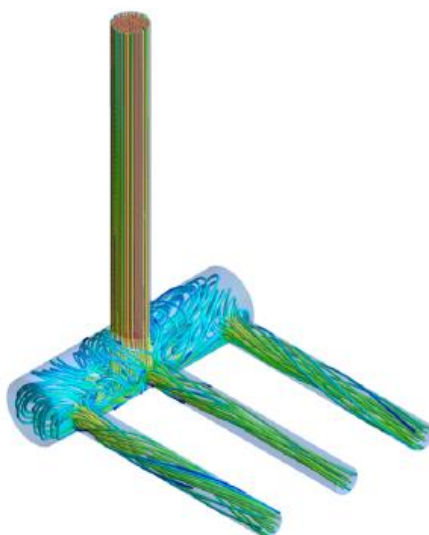


Figura 16 - Análise dinâmica do comportamento do fluido no coletor de distribuição (Adaptado de Documento de Projeto da Instalação – Arquivo Algafarm)

Uma vez que o sistema em estudo consiste num circuito hidráulico fechado com a finalidade de promover o crescimento de seres vivos, deve ser analisado de acordo com a sua finalidade e pela sua capacidade de resposta aos fatores biológicos em causa. Sendo assim, determinadas condições de operação como velocidade de escoamento, turbulência, transferência de massa e incidência solar, devem ser vistas como o objetivo principal e o sistema hidráulico como uma forma de responder a estas. Uma vez que as condições ideais de crescimento podem variar

de acordo com o tipo de microalga que se queira produzir, será sempre necessário dotar o sistema de capacidade de adaptação.

3.2 Diagnóstico à instalação

3.2.1 Classificação do Escoamento

Para se obter um melhor entendimento do que ocorre no sistema, é essencial a determinação do tipo de escoamento que se encontra a ocorrer nas diversas zonas do circuito. Os escoamentos de fluidos incompressíveis podem ser classificados através de uma relação adimensional entre a velocidade média do fluido, diâmetro interior da conduta, viscosidade dinâmica e massa específica do fluido. Esta relação adimensional designa-se por Número de Reynolds (Re) e apresenta-se da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (3)$$

Para valores de N^o de Reynolds inferiores a 2000, considera-se que o escoamento esteja em regime laminar, para valores entre 2000 e 4000 o escoamento encontra-se em regime de transição e para valores superiores a 4000 o escoamento encontra-se em regime turbulento.

Assim, para um caudal que garanta uma velocidade de escoamento na zona fótica de 1 m/s, o N^o de Reynolds irá variar ao longo do circuito da seguinte forma:

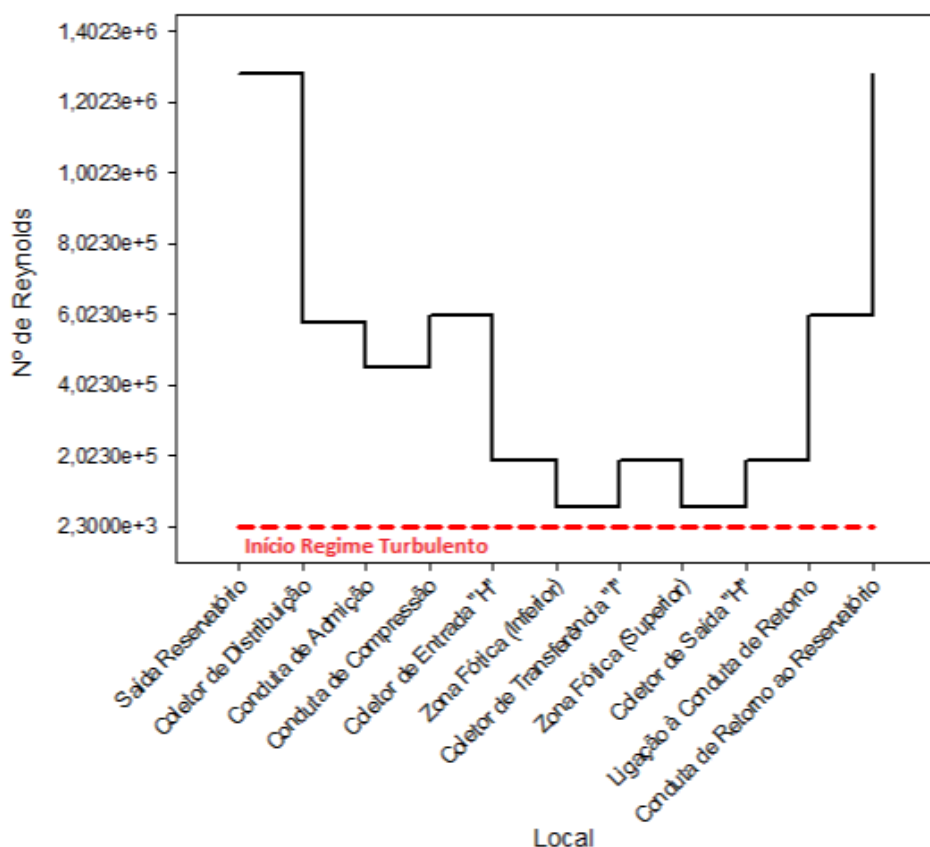


Figura 17 - Gráfico de variação do número de Reynolds ao longo do circuito.

3.2.2 Curva Teórica de perdas de carga do Sistema

Para se executar a análise de um sistema hidráulico, é essencial a determinação da perda de carga que a bomba terá que vencer. Para tal, foi utilizada a Equação de Bernoulli (4) com perdas para fluidos incompressíveis e escoamento em regime permanente (White, 2013) (Rubenstein, Yin, & Frame, 2012).

$$\frac{P_1}{\rho * g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho * g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (4)$$

Em qualquer sistema hidráulico real, existem perdas de carga associadas (h_f) devido a fatores como a viscosidade do fluido, rugosidade da tubagem e consequente atrito e também devido à presença de acidentes no circuito. Assim, dividem-se as perdas de carga em dois tipos distintos: Perdas de carga distribuídas (h_{fn}) e perdas de carga localizadas (h_{fl}). Sendo a perda de carga total o somatório das duas.

3.2.2.1 Cálculo das perdas de Carga Distribuídas

As perdas de carga distribuídas (h_{fn}) dizem respeito às perdas devido à rugosidade da tubagem e o seu cálculo pode ser feito recorrendo a equação de Darcy-Weisbach (5).

$$h_{fn} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

O sistema em estudo é composto por tubagens em material compósito (Fibra de vidro tipo E e resina poliéster) e por uma zona de tubagem em PMMA (polimetilmetacrilato) transparente. Como os componentes em fibra de vidro foram construídos especialmente para este circuito, não é possível aferir a rugosidade dos mesmos em qualquer catálogo de produtos *standard*. Sendo assim, após uma cuidada análise ao interior dos componentes, assumiu-se uma rugosidade semelhante à do PVC.

Como se viu anteriormente, em todas as zonas do circuito o escoamento encontra-se em regime turbulento, pelo que para o cálculo do fator de atrito (f) relativo a cada zona foi feita a iteração da equação de Colebrook-White (6).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{\frac{e}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Assim, como podemos ver na Figura 18, o valor das perdas de carga distribuídas totais no sistema é, para um caudal por bomba de 426 m³/h garantindo a velocidade de escoamento pretendida nas tubagens da zona fótica, de 3,67 m.c.a.

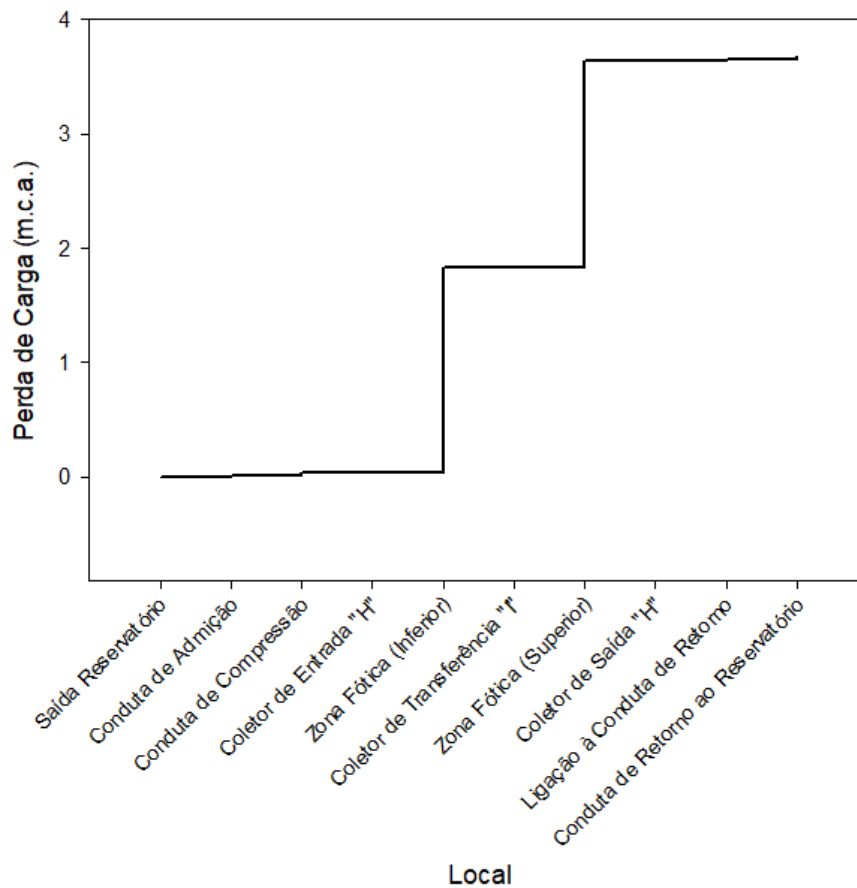


Figura 18 - Gráfico de perdas de carga acumuladas para um caudal de 426 m³/h.

3.2.2.2 Cálculo das perdas de carga localizadas

As perdas de carga localizadas (h_{fl}) estão associadas a acidentes presentes no circuito como válvulas, T's, curvas e outros acessórios do circuito.

$$h_{fl} = K * \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

O coeficiente de perda de carga K, varia consoante o tipo de acidente e o seu valor foi retirado da literatura existente (White, 2013) (Rubenstein et al., 2012). Como os sistemas em estudo possuem tubagens com geometrias que não constam na literatura, foi assumida uma similaridade com as geometrias que melhor se aproximam da realidade, podendo esse valor conter algum erro.

Assim, o valor das perdas de carga totais associadas ao sistema varia com o caudal Q segundo uma função polinomial do tipo $h_f = A + BQ^2$, sendo A e B constantes.

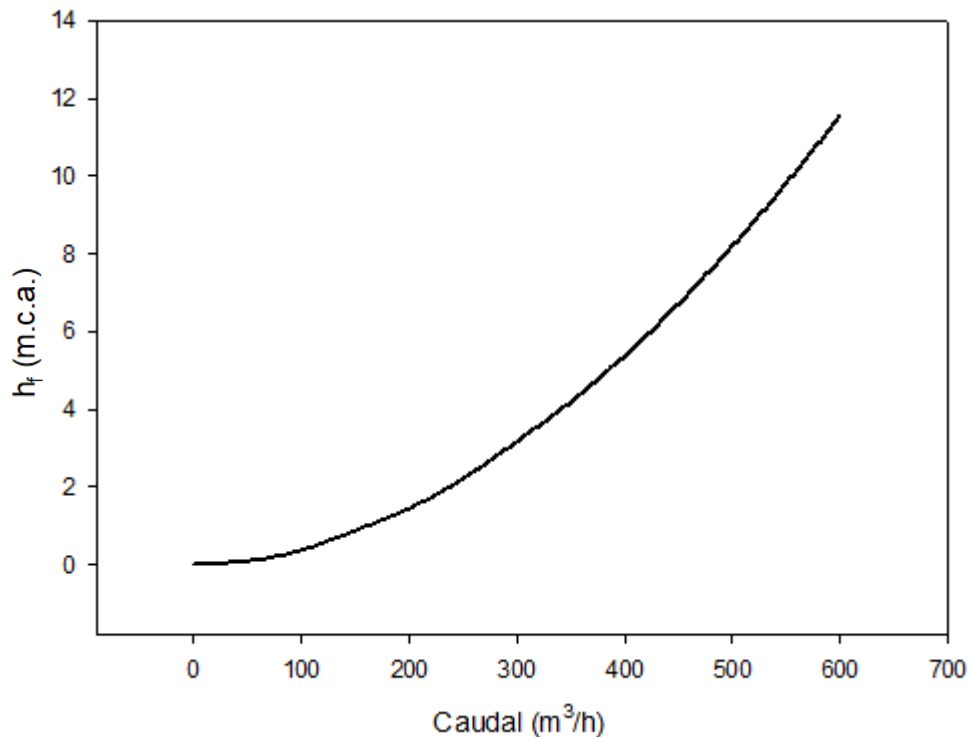


Figura 19 - Curva teórica das perdas de carga do sistema.

3.2.3 Medições de caudal

As medições foram feitas em meio aquoso - água com cultura de microalgas, mais concretamente *Chlorella Vulgaris*, em concentrações que variaram entre 0,5 a 1,2 g/L. Caracteriza-se por ser um fluido de base aquosa com partículas em suspensão de forma esférica e diâmetro compreendido entre 0 a 10 μm , com arejamento o que implica a existência de bolhas de ar no escoamento.

Assim, como não existe esse fluido como opção no caudalímetro utilizado, seguiu-se a recomendação do Engenheiro da marca e utilizou-se água residual por ser o fluido com as características mais próximas da realidade.

Além da aferição do caudal real de operação das bombas, as medições realizadas irão permitir avaliar o comportamento hidráulico do circuito e sua concordância com o que fora inicialmente idealizado durante o projeto do sistema ao nível do perfil de velocidade ao longo das tubagens da zona fótica.

3.2.3.1 Características dos Equipamentos Utilizados

Foram realizadas diversas medições com o caudalímetro por ultrassons DXN da Dynasonics (Figura 20). O Caudalímetro DXN consiste num equipamento não intrusivo de medição de caudal híbrido por ultrassons que pode operar utilizando transdutores de tempo de trânsito e/ou transdutores por efeito de doppler. A seleção do tipo de transdutor a utilizar e método de montagem é feita de acordo com as características do local, material, dimensões da tubagem e fluido de forma a se operar com um sinal o mais forte possível.



Figura 20 - Caudalímetro por ultrassons DXN da Dynasonics, utilizando transdutores de tempo de trânsito DTTN.

Nos transdutores de tempo de trânsito (TT), uma onda ultrassonora é enviada e recebida entre os dois transdutores e o tempo decorrido entre emissão e receção é medido, a diferença entre o tempo que a onda demora a percorrer o fluido está diretamente proporcional com a velocidade de escoamento do fluido pela seguinte Equação (8).

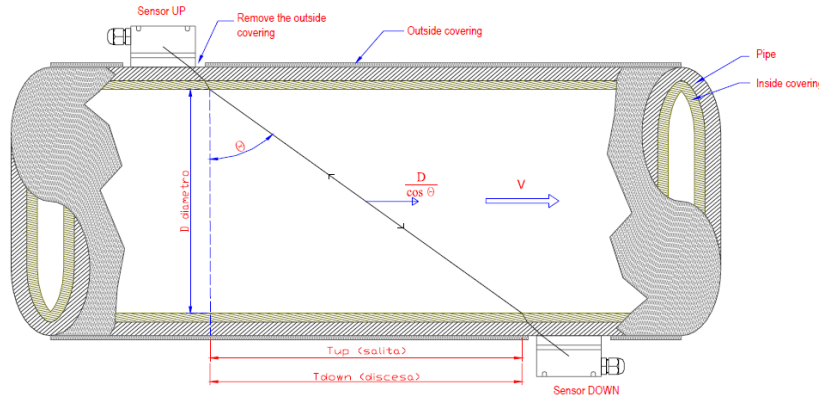


Figura 21 - Transdutores de TT: Esquema de Identificação de Elementos (Ficha Técnica – Caudalímetro TTFM100B)

$$v = \frac{M * D}{\sin(2\theta)} * \frac{\Delta t}{T_{up} * T_{down}} \quad (8)$$

Com,

$$T_{up} = \frac{\frac{M * D}{\cos(\theta)}}{C_0 + v * \sin(\theta)} \quad , \quad T_{down} = \frac{\frac{M * D}{\cos(\theta)}}{C_0 - v * \sin(\theta)}$$

Os transdutores podem ser montados em “V”, onde a onda de som atravessa a tubagem duas vezes, em “W”, onde a onda de som atravessa a tubagem quatro vezes, ou em “Z”, em que os transdutores se encontram instalados em lados opostos e a onda apenas atravessa a tubagem uma vez (Figura 22). Este tipo de transdutores são aconselhados para medições em fluidos “limpos” com poucas ou nenhuma partícula em suspensão ou presença de bolhas de ar.

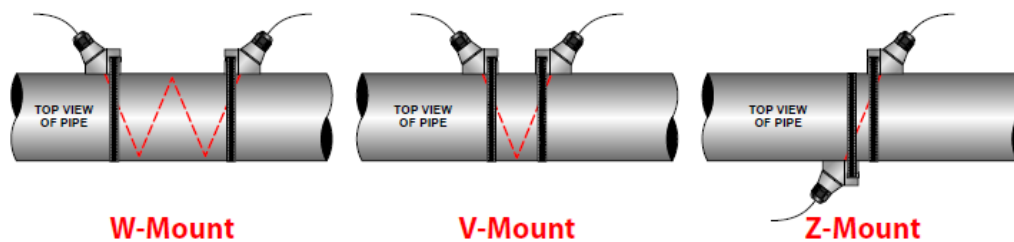


Figura 22 - Tipos de montagem dos transdutores (Ficha Técnica – Caudalímetro DXN).

Foram utilizados, consoante as características dimensionais da tubagem onde se pretendia medir, dois tipos de transdutores de tempo de trânsito: DTTN para condutas de maior dimensão e DTTSU para condutas de dimensão mais pequena.

Na medição de caudal recorrendo aos transdutores DT94 pelo efeito de doppler (DOP), o equipamento utiliza a onda ultrassónica que é refletida para aferir a velocidade do escoamento (V_f). Este cálculo é feito recorrendo à medição da variação da frequência da onda desde o emissor até ao recetor (Omega Engineering, 2016). Assim:

$$\Delta f = 2 * f_t * \sin(\theta) * \frac{V_f}{V_s} \quad (9)$$

Pela lei da reflexão de Snell: $\frac{\sin(\theta_t)}{V_t} = \frac{\sin(\theta)}{V_s}$

Então,

$$V_f = \frac{\Delta f}{f_t} * \frac{V_t}{\sin(\theta_t)} \quad (10)$$

É recomendado o uso de transdutores por efeito de doppler em fluidos com níveis significativos de partículas e/ou em escoamentos com a presença de bolhas de ar.

O caudalímetro DXN, devido à sua capacidade híbrida, permite a instalação e leitura dos transdutores por efeito de doppler e de tempo de trânsito em simultâneo escolhendo entre os dois tipos de transdutores através da qualidade do sinal que estes apresentem, sendo obrigatória uma qualidade de sinal sempre superior a 10% para se poder obter leituras. Com sinal até 40% o equipamento irá escolher a fonte de maior sinal, mas a partir de 40% o equipamento dá automaticamente preferência à leitura obtida pelos transdutores TT.

3.2.3.2 Descrição do processo experimental

Foram realizadas medições nos PBRs do tipo S, M e L, em locais estratégicos onde fosse possível a instalação do equipamento. Dessa forma, fez-se a instalação do equipamento na tubagem DN250 à saída da bomba, ao longo das 24 tubagens de zona fótica (DN50 em PMMA) e nas tubagens de retorno.

De acordo com as dimensões da tubagem é possível fazer uma pré seleção do tipo de transdutor e método de montagem a utilizar de acordo com a informação

disponível no manual do equipamento. Assim, para a tubagem DN250 que se encontra à saída da bomba foi utilizado o modo híbrido do equipamento, instalando-se os transdutores doppler DT94 e os transdutores TT DTTN em "V", sendo este tipo de montagem aconselhado para tubagens com diâmetros compreendidos entre 203 e 406mm.

Para as medições nas tubagens em acrílico transparente com diâmetro exterior de 63mm, tendo em conta o tipo de local e espaço presente para instalação e facilidade de montagem deste tipo de transdutores, foram utilizados os transdutores TT DTTSU, montados em "V", indicados para aplicação em tubagens com diâmetros compreendidos entre 19 e 61mm. Embora exceda o diâmetro recomendado para instalação em 2mm o sinal verificado após teste com o equipamento foi sempre forte (90%).

Para as tubagens de retorno foi utilizado o modo híbrido do equipamento, instalando-se os transdutores doppler DT94 e os transdutores TT DTTN instalados em "V" aplicável a tubagens com diâmetros compreendidos entre 203 e 406mm. Os diâmetros destas tubagens variam consoante o tipo de PBR, 300mm para os PBRs tipo S e 350 para PBRs do tipo M e L.

Para a realização das medições foi necessário fornecer ao equipamento algumas informações relativas à tubagem de instalação antes da montagem dos transdutores:

- Material em que é constituída a tubagem;
- Diâmetro exterior da tubagem;
- Espessura;
- Presença de isolamento, respetiva espessura e tipo de material.

Após inserir a informação anterior, o equipamento define qual a distância a que se devem encontrar os transdutores instalados (para o caso do DTTSU e DTTN) podendo-se então prosseguir com a instalação dos mesmos.

Na instalação dos transdutores, foi utilizada a massa multiusos de silicone 1110 da OKS para melhorar a acoplação acústica.

Propriedades da tubagem DN 250 à saída da bomba:

- Material: Fibra de vidro e resina poliéster. Como o equipamento não possui esse tipo de material foi escolhido PVC por ser o material que apresenta maior semelhança com o real.
- Diâmetro exterior: 272mm.
- Espessura: 11mm.

Propriedades da tubagem DN50 na zona fótica:

- Material: PMMA transparente. Como o equipamento não possui esse tipo de material foi escolhido PVC por ser o material que apresenta maior semelhança com o real.
- Diâmetro exterior: 63mm.
- Espessura: 3,5mm.

Neste trabalho, apenas serão estudados os PBRs do tipo L e, dessa forma, todas as medições apresentadas estão relativas somente a estes circuitos.

i. Medição de caudais à saída da Bomba (DN250)

Para os PBRs do tipo L, à semelhança ao que foi feito para o PBR S e M, foram medidos os caudais à saída da bomba alterando o variador de velocidade entre 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%. Como os PBRs tipo L, possuem três



Figura 23 - Instalação em modo híbrido à saída da bomba.

circuitos paralelos e por sua vez três bombas, foram realizadas medições apenas num deles, nomeadamente no circuito associado à bomba nº3.

Uma vez que a tubagem onde foi instalado o equipamento não possui o comprimento necessário para respeitar os diâmetros de espaçamento recomendados de forma a garantir a fiabilidade das medições e erro mínimo, seguiu-se a indicação do mesmo para este tipo de casos, tendo sido dividido comprimento da tubagem em três, e a instalação feita a 2/3 desde montante, desta forma não é possível quantificar a quantidade de erro que esteja associado a estas medições.

ii. Medição dos caudais na vertical na zona fótica:

Foram feitas medições de caudal ao longo dos 24 tubos em PMMA num PBR do tipo L. Foi feita uma sucessiva alteração dos valores do variador de velocidade entre 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% e foram registadas as medições no caudalímetro. Como o sinal dos transdutores TT teve sempre uma qualidade relativamente constante em torno dos 90% e foi possível respeitar as regras de instalação no âmbito dos diâmetros necessários a jusante e montante, podemos considerar o erro associado às medições como sendo $\pm 1\%$ do valor lido.



Figura 24 - Instalação dos transdutores TT na zona fótica.

3.2.4 Medições de pressão

Uma vez que os fotobiorreatores apresentam tubulações com geometrias pouco convencionais, procurou-se uma forma prática e alternativa de aferir a perda de carga que ocorre ao longo do mesmo efetuando-se medições de pressão em locais estratégicos do circuito.

Foram instalados manómetros de *Bourdon* helicoidais analógicos, de classe de precisão CL 1,0, nos locais onde havia essa possibilidade e foi registada a variação de pressão consoante a alteração da velocidade de rotação das bombas.

Foi colocado um manómetro à saída da bomba e um segundo na tubagem de retorno ao depósito. Sendo assim, a perda de pressão entre os dois pontos em estudo calculou-se através da diferença nos valores aferidos nos dois manómetros.



Figura 25 - Instalação de manómetro na compressão da bomba

3.2.5 Regime de operação das bombas

Uma vez calculada a curva teórica do sistema, foi possível utilizando a ferramenta de seleção de equipamentos do fabricante, definir as curvas de trabalho da bomba para cada regime de variação de velocidade. Para isso, foi necessário aferir qual a velocidade de rotação da bomba a cada percentagem de operação. No *software* do fabricante da bomba, foi cruzada a curva de perda de carga calculada com as frequências de trabalho lidas no display do variador de velocidade obtendo-se assim as curvas para cada regime de operação (ver Anexo 1).

Tabela 1 -Ponto de operação da eletrobomba

Caudal de Operação	426	m ³
Altura Desenvolvida	7,45	m.c.a
Rendimento	86,3	%
Potencia Consumida no Veio	10	kW
Velocidade de Rotação	762	rpm
NPSH	2,54	m.c.a

3.3 Estudo da incidência solar

Após uma análise visual da distribuição da radiação solar ao longo do PBR, foram identificados fenómenos de sombreamento provocados entre tubagens. Esta heterogeneidade na distribuição leva a que haja uma diminuição significativa da radiação que consegue chegar às tubagens que se encontram no interior da zona fótica.

3.3.1 Medições de radiação no interior do PBR

Para se proceder à avaliação da radiação que efetivamente é recebida pelas tubagens no interior do reator, foram realizadas 3 medições da radiação incidente em locais estratégicos através de um fotómetro sensível a valores de radiação incidente com comprimento de onda compreendida na gama do visível (400 a 700 nm).

Para a realização das medições foi utilizado o Fotómetro Universal Light Meter (ULM) – 500, da marca alemã Heinz Walz GmbH. A principal função deste equipamento é a medição e registo de radiação solar em *flux of quanta* ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), dentro da gama de comprimentos de onda fotossinteticamente relevantes (PAR) através de sensores de geometria esférica. Este equipamento (Figura 26) possui uma capacidade de resolução de 0.1 a 99 999 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e capacidade para armazenar 50 mil pontos de medição.

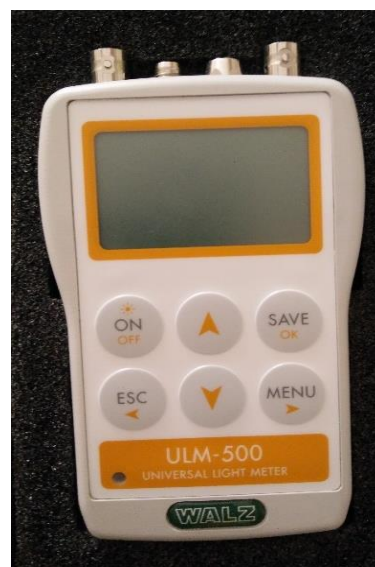


Figura 26 - Light Meter ULM 500

Foi utilizado o sensor Spherical Micro Quantum Sensor US-SQS/L. Este tipo de sensor deteta a quantidade de radiação PAR que chega à pequena esfera que possui na extremidade da sonda, de todas as direções, dividindo esse valor pela área da secção transversal da esfera e intervalo de tempo de ocorrência.

Foram efetuadas medições ao longo das colunas de tubagens de um reator do Tipo L variando a posição do sensor verticalmente ao longo das 24 Linhas, registando-se os valores de radiação PAR obtidos em cada local.

Na Figura 27 podemos ver, representados pelos nº 1, 2,..., 8, as posições onde foi colocado o sensor ao longo da linha 1, tendo sido repetidas estas posições de duas em duas linhas para as restantes 24 linhas do reator.

Com a finalidade de diminuir o tempo necessário para executar cada varrimento e desta forma obter valores mais comparáveis entre colunas, optou-se efetuar medições de duas em duas linhas considerando, após uma análise visual ao

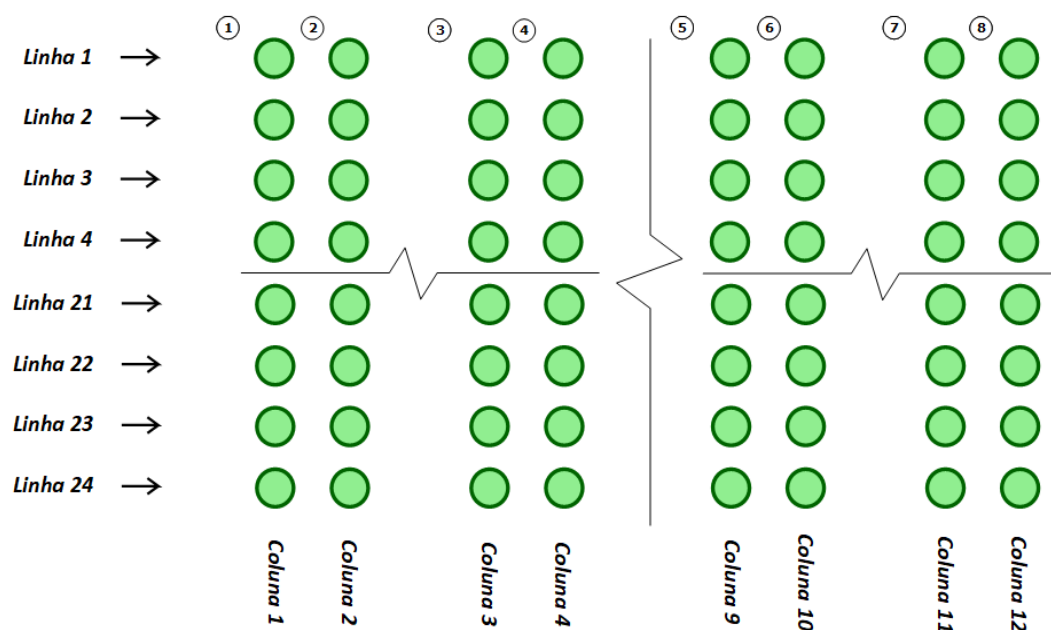


Figura 27 - Representação dos locais de medição de radiação no PBR.

perfil de sombreamento no reator, que a radiação que chega às colunas 5 e 7 seria igual à radiação incidente na coluna 9 e as colunas 6 e 8 seriam equivalentes à coluna 10.

Dado que para efetuar as medições era necessário a alteração e posicionamento não só do sensor como por vezes também do escadote de elevação, para cada varrimento as medições foram efetuadas dentro de um espaço temporal de 1 hora, tendo sido feitos 3 varrimentos.

Uma vez que nos dias em que o equipamento se encontrava disponível coincidiram com uma altura em que o céu se encontrava bastante nublado, apenas se realizaram as medições no dia 28 de Junho de 2018, entre a 13H e as 17H, altura em que o céu se encontrava mais limpo. Mesmo assim, durante o período de tempo

em que as medições foram feitas, existiram vários rastos de condensação resultantes da passagem de aviões que dificultaram as medições e podem ter influenciado os valores de radiação obtidos.

3.3.2 Modelo de aquisição de valores de radiação incidente

Para avaliação e comparação de cenários alternativos propostos relativamente à configuração da zona fótica, foi feita a simulação dos sistemas com recurso ao software *DesignBuilder*.

O *DesignBuilder* consiste numa interface gráfica para o software de modelação térmica dinâmica em edifícios *EnergyPlus* e é amplamente utilizado em projetos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado na conceção de sistemas energéticos otimizados. Este programa permite a criação de geometrias 3D representativas dos edifícios em estudo, executar a caracterização do edifício e determinar os consumos energéticos e potências de climatização. As simulações efetuadas contemplam os efeitos da temperatura externa ao edifício, através da informação contida nos ficheiros climáticos .epw que podem ser obtidos através da base de dados do EnergyPlus ou da ferramenta Excel disponibilizada pelo laboratório nacional de energia e geologia (LNEG), cargas térmicas interiores (equipamentos e ocupação), vento e incidência solar.

Para o estudo efetuado, foram criadas matrizes tubulares representativas da geometria da zona fótica (Figura 28) através da ferramenta component block tipicamente utilizada para representar o efeito de sombreamento da radiação direta solar, reflexão da radiação solar e sombreamento da radiação difusa solar nos modelos em estudo durante a modelação.

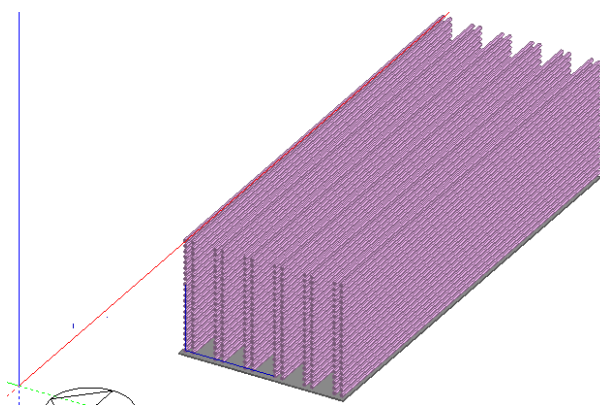


Figura 28 - Representação 3D no DesignBuilder para simulação da radiação incidente na linha 22.

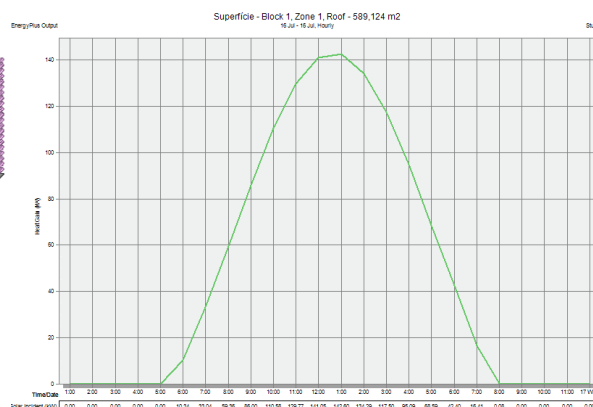


Figura 29 - Variação da radiação incidente na linha 22 ao longo do dia em estudo. Resultados obtidos através da simulação para um dia típico de Julho.

A ferramenta *Component Block* permite-nos definir o tipo de material do elemento, a transmitância e seu horário. Para todos os cenários simulados foi considerado o material como sendo polimetil-metacrilato e uma transmitância constante de 0%. A fim de definir o mais corretamente possível o parâmetro transmitância, foram feitos vários varrimentos em espectrofotômetro para radiação com comprimentos de onda dentro da gama PAR para biomassa em diferentes concentrações. Através dos resultados observados para os valores de absorvância e concentrações típicas em que os PBR são inoculados, é seguro considerar que toda a radiação incidente nas tubagens da zona fótica é absorvida resultando numa transmitância de 0%.

Depois de criada a geometria os dados de radiação incidente ao longo dos dias em estudo será obtida através da quantidade de energia solar que chega a uma superfície localizada entre tubos contabilizando o efeito do sombreamento provocado pelas linhas que se encontram no seu topo (Figura 29).

Para as simulações efetuadas foram utilizados os dados climáticos referentes a Marinha Grande, Leiria, obtidos através da ferramenta Excel de conversão para *energyplus weather data* CLIMAS-SCE. Uma vez analisadas as diferentes trajetórias solares (Figura 30) ao longo do ano, optou-se por simular um dia típico em três meses com trajetórias distintas: Julho, Abril e Dezembro.

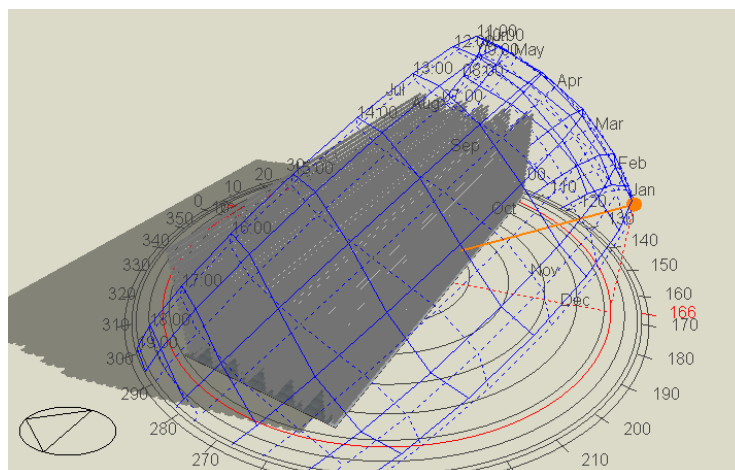


Figura 30 - Renderização das diferentes trajetórias solares ao longo do ano.

3.3.2.1 Cenários Propostos

Uma vez que os fotobiorreatores possuem elementos hidráulicos com geometrias e posições fixas e sem flexibilidade que nos permita aumentar ou diminuir o espaçamento entre tubos, como é o caso dos coletores de distribuição (H's) e transferência (I's), procurou-se manter essas mesmas geometrias mas retirar metade das tubagens da zona fótica de forma o mais simétrica possível. Sendo assim, foi avaliado o desempenho na receção de radiação solar no interior do PBR nos três novos cenários estudados comparando-os com a configuração original (Cenário Base - Figura 31).

No cenário A, como é visível pela Figura 32, foram retiradas tubagens de forma intercalada, reduzindo o número de tubagens da zona fótica para metade. No cenário B, como é visível na Figura 33, foram retiradas 12 linhas ao sistema passando o sistema a operar com metade do número de tubagens original. No cenário C, como é visível na Figura 34, foram retiradas 6 colunas verticais de tubos reduzindo o número de tubagens da zona fótica para metade. Em todos os novos cenários estudados ocorreu uma redução no volume global do reator de 33% passando de 103 m³ para 69 m³, considerando o enchimento do depósito do reator a 70% da sua capacidade nominal.



Figura 31 - Representação simplificada da configuração do Cenário Base.

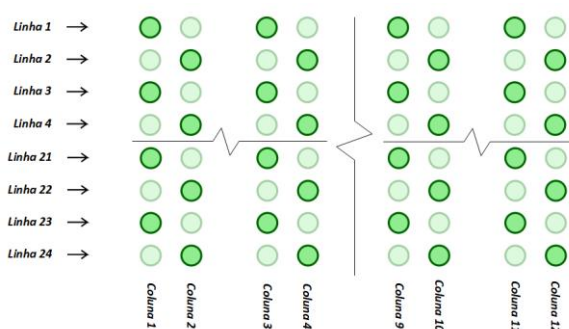


Figura 32 - Representação simplificada da configuração do Cenário A.



Figura 33 - Representação simplificada da configuração do Cenário B.

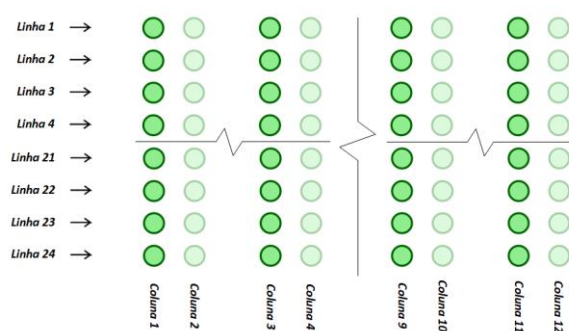


Figura 34 - Representação simplificada da configuração do Cenário C.

3.4 Análise da cinética de crescimento da espécie

Atendendo a que o crescimento das microalgas se encontra afeto a fatores externos ao fotobiorreator, como é o caso da temperatura e radiação solar incidente, procurou-se encontrar uma relação entre estes fatores de forma a se obter uma visão relativamente aos valores em que o PBR é mais produtivo. Assim, foi correlacionado o crescimento biológico que ocorreu durante um determinado período de tempo de operação com as condições em que se encontravam na altura de produção. Para tal foram utilizados os dados armazenados no sistema de aquisição de dados e controlo local relativamente à temperatura, radiação solar incidente e turbidez.

Uma vez que o sistema automático de aquisição de dados monitoriza e regista a evolução do crescimento biológico dos reatores através das variações na turbidez, foi necessário encontrar uma correlação (Figura 35) entre a turbidez (NTU) e o registo dos pesos secos (g/l) realizados laboratorialmente de forma a utilizar os dados disponíveis no sistema na determinação das taxas específicas de crescimento.

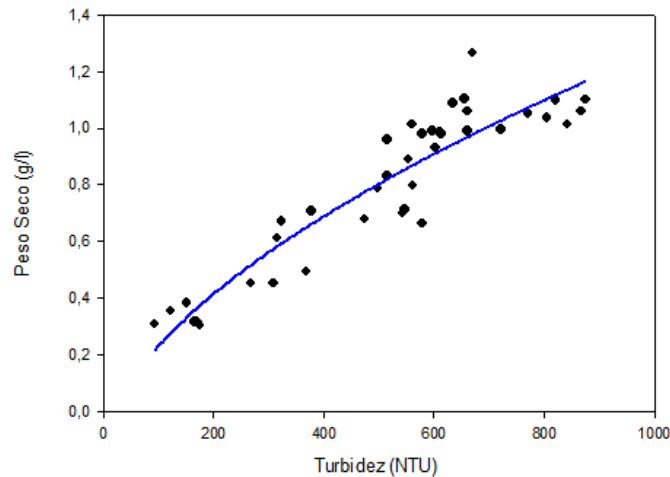


Figura 35 - Relação entre a turbidez e o peso seco do PBR.

Após análise da distribuição gráfica dos dados experimentais, considerou-se que esta seguia a tendência semelhante a uma curva de potência, chegando-se à seguinte equação (11) com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8675, em que PS representa o peso seco em g/l e a variável x representa a turbidez em NTU.

$$PS(x) = 0.0258x^{0.5795} - 0.1408 \quad (11)$$

Em seguida a taxa específica de crescimento (dPS/dt) poderá ser calculada através da equação (12).

$$\frac{dPS}{dt} = \frac{\frac{PS_f - PS_i}{PS_f}}{t_f - t_i} \quad (12)$$

3.4.1 Relação entre a temperatura e a radiação incidente

Procurou-se encontrar uma correlação entre a temperatura média diurna registada a que o PBR se encontrava com a radiação solar média, em W/m^2 , que se registou nesse dia.

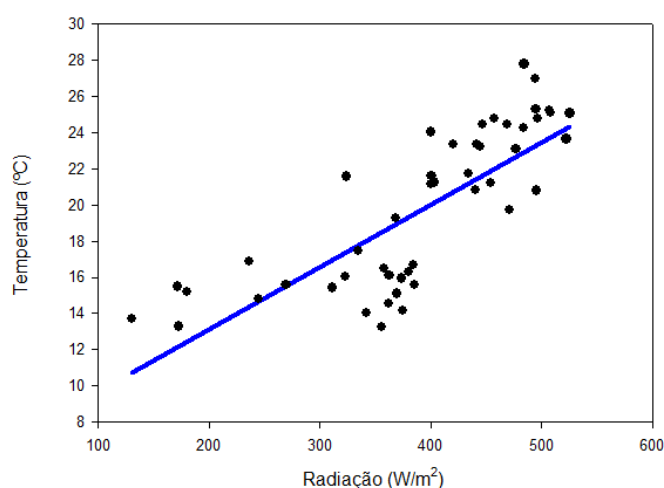


Figura 36 - Variação da temperatura no interior do PBR com a radiação solar incidente.

$$T(RAD) = 0,0344RAD + 6,26 \quad (13)$$

A equação (13), obtida através da aplicação de um modelo de regressão linear simples, apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.62, o que significa que a correlação apresentada é representativa de 62% dos dados estudados. Assim, a equação considerou-se passível de ser utilizada para descrever uma tendência relativamente ao fenómeno em estudo mesmo contendo um elevado grau de incerteza associado, porém é necessário ter em consideração a presença desta mesma incerteza em futuras aplicações da equação e análise dos resultados dessa aplicação (Hadi, 2012).

3.4.2 Relação entre a temperatura e o crescimento

A influência da temperatura no crescimento biológico da *chlorella vulgaris* já tinha sido estudada previamente pela equipa Algafarm através da equação (14) proposta por Boyd et al. em 2013, em que a taxa específica de crescimento varia em função da temperatura e de determinados parâmetros estimados (z , w , a e b) tendo sido estes últimos obtidos através do *best fit* da equação com os pontos

experimentais registados durante a produção. Na equação, o parâmetro w representa a largura da gama de temperaturas enquanto os restantes parâmetros z , a e b não representam qualquer significado biológico explícito (Boyd et al., 2013).

$$f(T) = ae^{bT} \left[1 - \left(\frac{T - z}{\frac{w}{2}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Com: $a=0.0230$, $b=0.1527$, $z=20.907$ e $w=28,480$.

Segundo o estudo efetuado, como se pode verificar através da Figura 37, a gama de temperatura ótima para produção da espécie em causa ronda 30 °C atingindo a estas temperaturas taxas específicas de crescimento na ordem dos 1,4 D⁻¹.

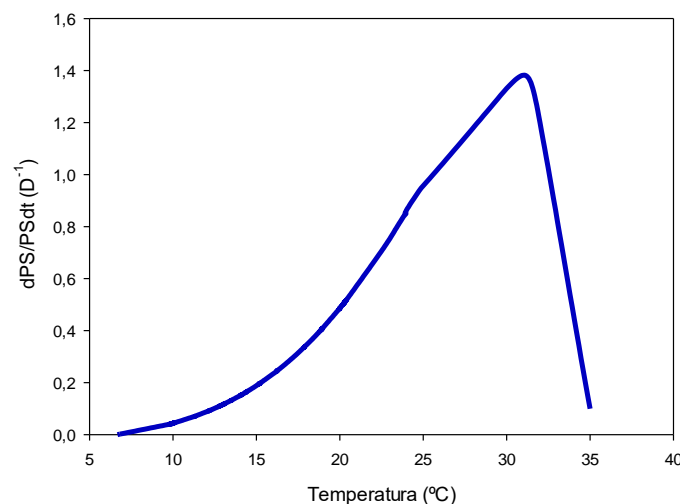


Figura 37 - Influência da temperatura do PBR na taxa específica de crescimento.

3.4.3 Relação entre a radiação e o crescimento

Em concordância com o que foi referido anteriormente, a disponibilidade de radiação solar é um fator essencial para o crescimento de microrganismos fotossintéticos. Assim sendo, procurou-se chegar a uma relação, partindo dos dados experimentais disponíveis no sistema de aquisição de dados e controlo local, entre as taxas específicas de crescimento durante o período de produção e a radiação solar incidente nessa mesma data. Numa primeira fase foram analisados todos os

dados relativos ao ano de 2017 em que os reatores se encontravam em produção autotrófica em cadências temporais de 15 em 15 minutos, de seguida foram analisados dados numa cadência temporal horaria e por fim diária. Em todos os casos estudados não foi possível observar uma tendência de dependência entre os elementos estudados, como podemos aferir pela distribuição apresentada pela Figura 38.

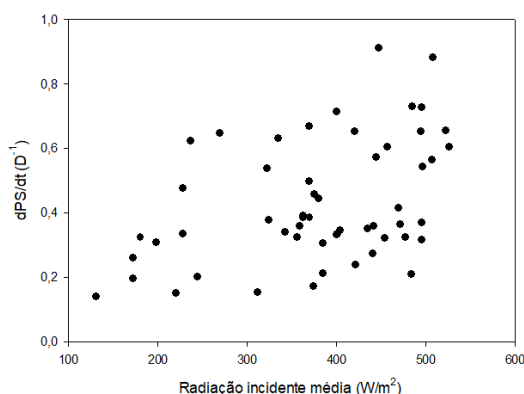


Figura 38 - Variação da taxa específica de crescimento com a radiação incidente média diária.

No cultivo em ambiente exterior, a previsão da taxa de crescimento através de um elemento em particular pode tornar-se bastante complexa uma vez que esta é influenciada por diversos fatores como a temperatura, pH, concentração de oxigénio dissolvido e disponibilidade de nutrientes (Mata et al., 2010).

Uma vez que não foi possível chegar a uma relação direta através dos dados analisados, foi criada uma nova equação para previsão de taxas de crescimento através da radiação solar incidente partindo das equações (13) e (14). Para esta nova equação (15), assumindo que os fotobiorreatores não contarão com aquecimento durante qualquer época do ano e a termorregulação estará calibrada de forma a manter uma temperatura ótima de operação (30 °C) sempre que a radiação incidente é superior a 690 W/m².

$$f(RAD) = \begin{cases} ae^{b(0,0344RAD+6,26)} \left[1 - \left(\frac{(0,0344RAD + 6,26) - z}{\frac{w}{2}} \right)^2 \right] & \text{Se, } 0 < RAD < 690 \text{ W/m}^2 \\ ae^{b(30)} \left[1 - \left(\frac{30 - z}{\frac{w}{2}} \right)^2 \right] & \text{Se, } RAD \geq 690 \text{ W/m}^2 \end{cases} \quad (15)$$

4 Resultados

4.1 Medições de caudal

Após uma análise comparativa entre os valores obtidos através das medições à saída da bomba com os valores obtidos nos 24 tubos de acrílico (Tabela 2), podemos verificar uma discrepância significativa na ordem de grandeza desses mesmos valores. Uma vez que nas medições à saída da bomba não foi possível, com o espaço disponível para instalação, respeitar as regras descritas no manual do equipamento ao nível nos diâmetros de espaçamento para o local de instalação a jusante e montante, não nos é possível ter a confiança necessária para utilizar essas medições. Assim, optou-se por somar os caudais medidos nas tubagens em acrílico de ida e retorno, assumindo simetria entre as linhas paralelas do sistema (Tabela 3).

Tabela 2- Medição dos caudais na vertical zona fótica em m³/h.

Consumo da bomba Nº 3 (kWh)	1,9	2,6	4,1	6,1	8,5	11,7
Linha	50%	60%	70%	80%	90%	100%
24	4,42	5,11	6,18	7,30	8,48	9,55
23	4,39	5,16	6,07	7,06	8,02	8,98
22	4,86	5,69	6,74	7,85	8,78	9,85
21	4,78	5,66	6,67	7,67	8,68	9,72
20	4,85	5,71	6,83	7,86	8,86	9,89
19	4,30	5,11	6,02	7,00	7,90	8,73
18	4,47	5,25	6,23	7,22	8,12	9,04
17	4,50	5,37	6,33	7,27	8,21	9,16
16	4,69	5,61	6,72	7,69	8,67	9,66
15	4,56	5,37	6,29	7,27	8,23	9,20
14	4,93	5,85	6,82	7,83	8,81	9,79
13	4,11	4,87	5,68	6,77	7,64	8,57
12	4,57	5,43	6,63	7,95	9,07	10,05
11	5,09	5,73	6,80	7,90	8,89	9,92
10	4,73	5,43	6,31	7,18	8,07	8,92
9	4,72	5,31	6,14	7,14	8,10	9,08
8	5,58	6,40	7,53	8,68	9,88	11,02

7	4,76	5,57	6,43	7,39	8,25	9,24
6	5,45	6,26	7,43	8,50	9,51	10,68
5	5,18	6,01	7,08	8,17	9,10	10,31
4	5,84	6,88	7,99	9,13	10,31	11,55
3	6,03	7,00	8,16	9,39	10,58	11,84
2	5,46	6,36	7,33	8,27	9,37	10,44
1	5,66	6,47	7,69	8,70	9,84	11,08

Fazendo a média dos valores obtidos nas 24 tubagens é possível verificar a variação dos valores de escoamento por tubagem. Assim, a variação máxima é de -18% e ocorre na linha 9 com o variador a 50%.

Analisando a variação dos valores de caudal quando o sistema se encontra a operar próximo do caudal de projeto (100%), a variação máxima em relação ao valor médio é de -13% e ocorre na linha 9. Desta forma, através das medições efetuadas, foi registada uma variação de caudal superior aos 5% previstos pela modelação computacional realizada na fase de projeto.

Tabela 3 – Somatório de caudais nas tubagens de ida e retorno na zona fótica em m^3/h .

Variação de velocidade	Ida	Retorno	Média
50%	184,20	211,08	197,64
60%	216,48	245,72	231,10
70%	259,36	289,16	274,26
80%	302,16	332,12	317,14
90%	344,92	374,52	359,72
100%	387,08	416,92	402,00

Após a soma dos caudais que escoam nas tubagens em acrílico de ida e retorno, utilizou-se o valor médio entre ambos. Verificou-se uma variação em relação ao valor médio calculado de $\pm 4\%$ para os PBR's tipo L.

4.2 Medições de pressão

Uma vez efetuadas as medições de pressão na zona de compressão da bomba e tubagem de retorno ao depósito, foi possível obter o gráfico da curva de perda de carga apresentado na Figura 39. Neste gráfico, é visível o aumento da perda de carga que ocorre no sistema com o aumento da velocidade de operação das bombas e consequente aumento de caudal.

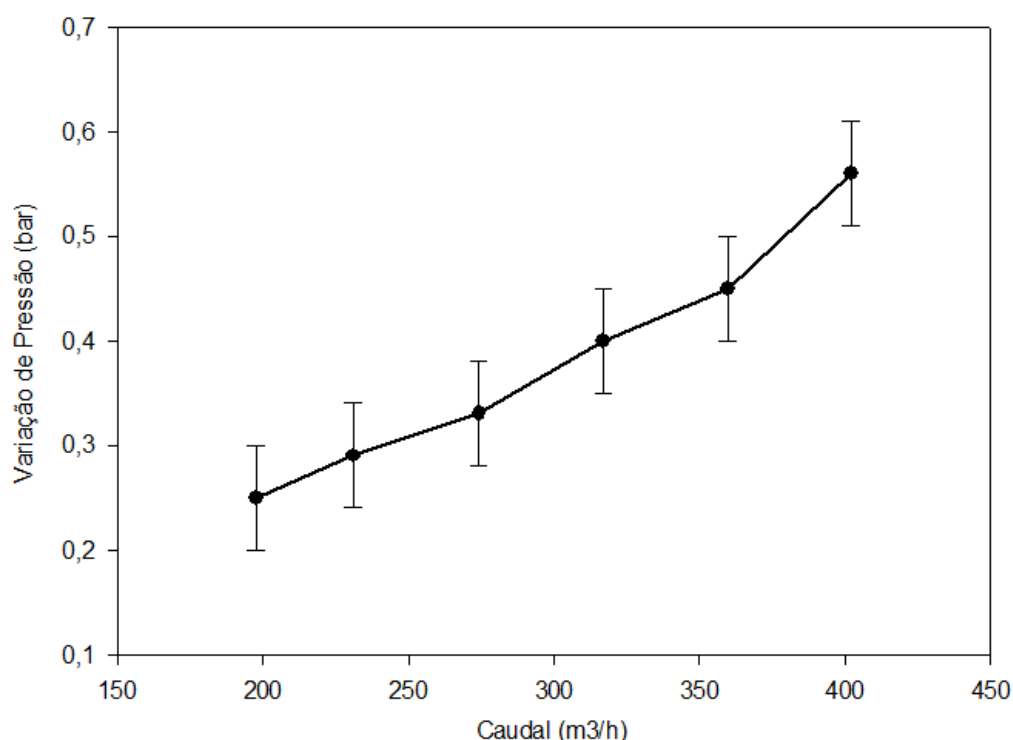


Figura 39 - Gráfico com a variação de pressão obtida através das medições efetuadas do reator.

4.3 Correlação entre medições de caudal, medições de pressão, pontos de operação das bombas e curva teórica do sistema.

Após a análise, é possível relacionar a curva do sistema calculada com a curva de desempenho da bomba para uma determinada variação de velocidade. Pela união de ambas as curvas, é possível saber qual o caudal teórico que a bomba nessas circunstâncias deveria debitar e compara-lo com o caudal medido *in situ*. Uma vez feita esta comparação, é visível que o caudal medido é consideravelmente inferior ao que o fabricante da bomba diz que a bomba deveria debitar.

Esta discrepância pode ser justificada ou pelo mau estado do equipamento baixando o rendimento do mesmo ou uma vez que os elementos constituintes do circuito hidráulico (Coletor de distribuição, H's, I) não são acessórios típicos presentes na literatura, as perdas de carga associadas ao sistema são superiores ao inicialmente calculado. Durante uma paragem de operação, foi analisado o estado da voluta e do impulsor, verificando-se que estes não se encontravam em mau estado. Sendo assim, considerou-se um fator geométrico F.G. de correção da curva do sistema aumentando assim a curva em 20% forçando o encontro com as medições de pressão efetuadas no circuito (Figura 40).

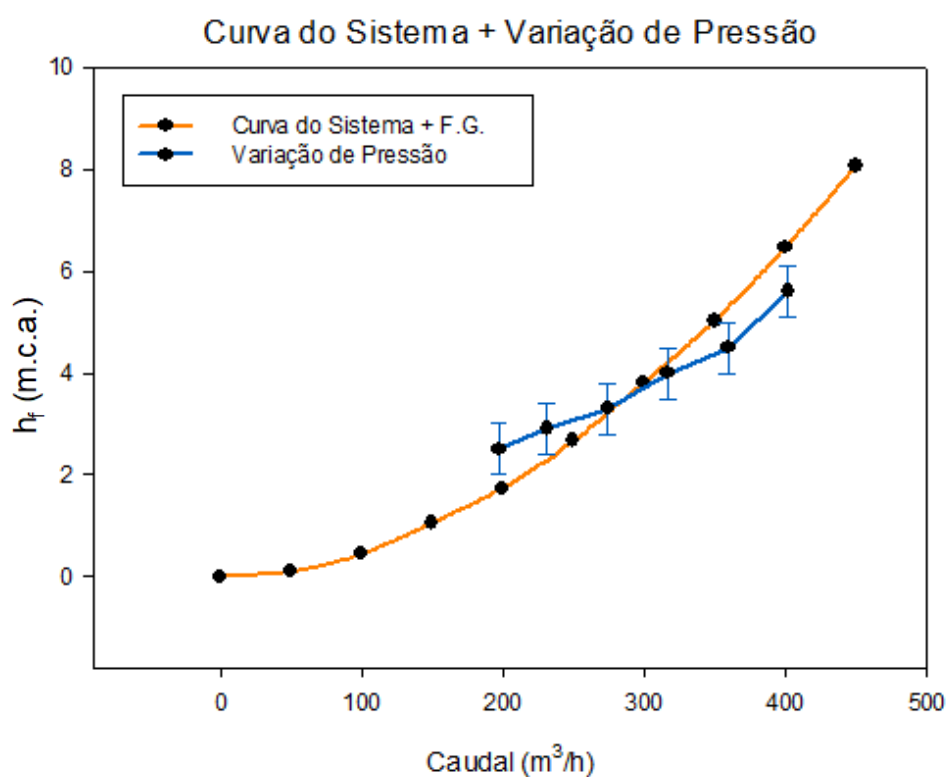


Figura 40 - Gráfico da curva do sistema com a aplicação do fator geométrico.

Com a aplicação do fator geométrico à curva de perda de carga do sistema, podemos ver (Tabela 4) uma melhor relação entre os resultados obtidos através da medição de caudal e os caudais teóricos espectáveis segundo o fabricante da bomba.

Tabela 4 -Comparação de caudais.

VARIAÇÃO DE VELOCIDADE	Freq. (Hz)	RPM	Caudal Medido (m ³ /h)	Caudal teórico Fabricante (m ³ /h)	Caudal teórico + F.G. (m ³ /h)
50%	20,00	391	198	235	220
60%	23,04	451	231	270	255
70%	26,88	526	274	310	295
80%	30,72	601	317	360	340
90%	34,56	676	360	410	380
100%	38,40	751	402	450	420

4.4 Medição da variação da radiação incidente no interior do PBR

Uma vez executadas as medições, foi feita a média dos valores comparáveis nos três varrimentos obtendo-se o gráfico presente na Figura 41, representativo da variação da intensidade da radiação solar incidente ao longo das 24 linhas do PBR.

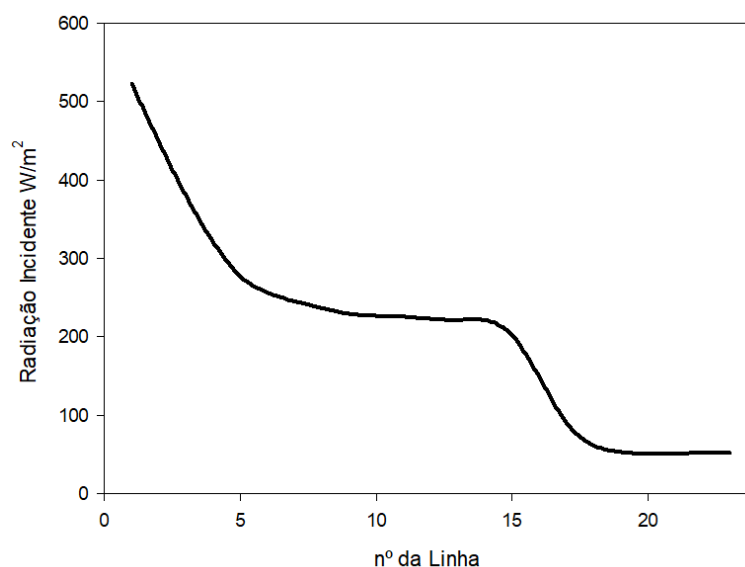


Figura 41 - Gráfico da variação da radiação ao longo do PBR L8 - Dia 28/06/2018, entre as 13h e 17h.

Assim, segundo os resultados obtidos através das medições efetuadas, é notória uma rápida redução na intensidade da radiação incidente entre a linha nº 1 (que se encontra a uma cota mais elevada) e a linha nº 5, mantendo-se depois relativamente constante até à linha nº 14 e voltando a decair abruptamente nas linhas inferiores do reator.

5 Estudo de cenários de otimização do sistema

5.1 Alteração do sistema para operação com duas bombas em paralelo

O cenário em estudo consiste na avaliação dos impactos nos consumos energéticos da alteração do sistema de três bombas individuais para um grupo de duas bombas em paralelo. Para isso, foram estudados dois perfis de operação diferentes de acordo com o que é tipicamente aplicado: Um primeiro em que o sistema se encontra em operação contínua com o variador a 90% e um segundo em que o sistema se encontra em operação contínua (90%) apenas durante o dia, ligando 5 minutos a cada hora durante o período noturno. Em ambos os casos foram comparados os consumos associados à disposição original com o cenário em estudo de duas bombas em paralelo, procurando garantir que ambos os sistemas debitem o mesmo caudal. Os consumos foram calculados através da literatura existente e validados com a informação que o fabricante da marca fornece.

Para o caso em que o sistema se encontra sempre em operação (90%) foram utilizados como referência os consumos da bomba nº3 do L1 no dia 1 de janeiro de 2016, e os resultados estão descritos na seguinte Figura 42.

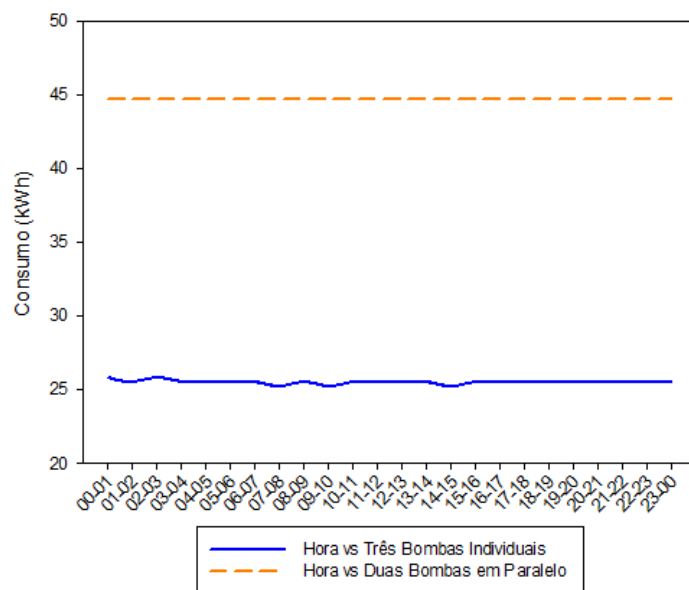


Figura 42 - Comparação de consumos para o dia 1 de janeiro de 2016.

A aplicação deste projeto teria um baixo investimento inicial, pois apenas seria necessária a instalação de um coletor de convergência à saída do grupo de bombagem, no entanto esta alteração resultaria num aumento de consumo de energia elétrica de 461,9 kWh/dia (99,3 kgep/dia) e um aumento de emissões de CO₂ na ordem dos 217 kgCO₂/dia.

Para o segundo caso em que o sistema se encontra em operação contínua (90%) apenas durante o dia, ligando 5 minutos também a 90% a cada hora durante o período noturno, foram utilizados como referência os consumos da bomba nº3 do L7 relativos ao dia 13 de junho de 2016 e o somatório dos consumos está descrito na seguinte Figura 43.

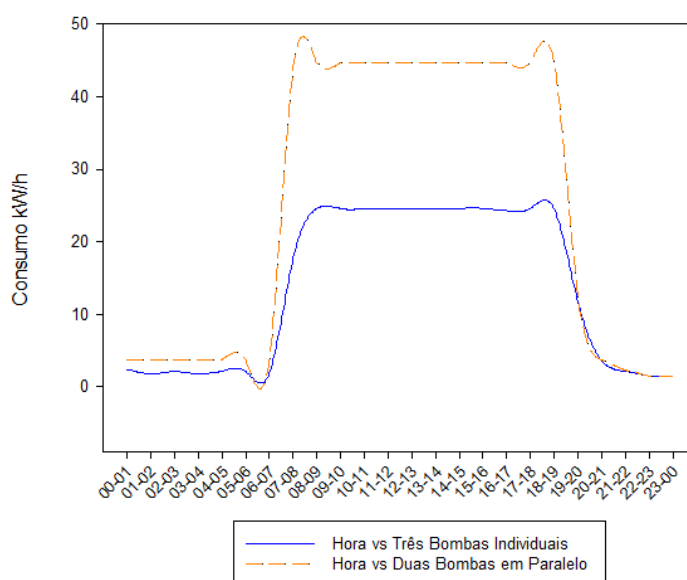


Figura 43 - Comparação de consumos para o dia 13 de junho de 2016.

A aplicação deste projeto teria um baixo investimento inicial, pois apenas seria necessária a instalação de um coletor de convergência à saída do grupo de bombagem, no entanto esta alteração resultaria num aumento de consumo de energia elétrica de 261,26 kWh/dia (56,17 kgep/dia) e um aumento de emissões de CO₂ na ordem dos 122.8 kgCO₂/dia.

Desta forma, é possível ver que para os caudais em causa as duas bombas em paralelo apresentam consumos bastante superiores aos resultantes do somatório das três bombas individuais. Sendo assim, não seria benéfica a alteração do sistema para duas bombas em paralelo em ambas as situações.

5.2 Estudo de viabilidade de implementação de um sistema fotovoltaico de autoconsumo

Um dos cenários em estudo seria a implementação de um sistema solar de autoconsumo fotovoltaico de forma a que seja feito um aproveitamento da radiação solar de acordo com o espaço disponível para implementação do sistema.

Utilizando o Software PV*SOL 2017 da *Valentin Software*, foi feito um modelo tendo por base o perfil típico de consumo dos PBRs para os períodos de inverno, verão (Figura 44), primavera/outono e o consumo mensal de todos PBRs para o ano de 2016.

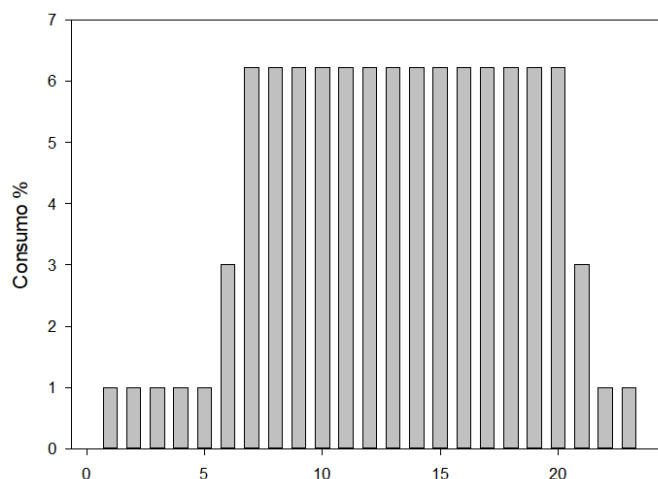


Figura 44 - Perfil típico de consumos para um dia de verão em operação contínua durante o dia a 90% e 5 minutos a cada hora durante o período noturno.

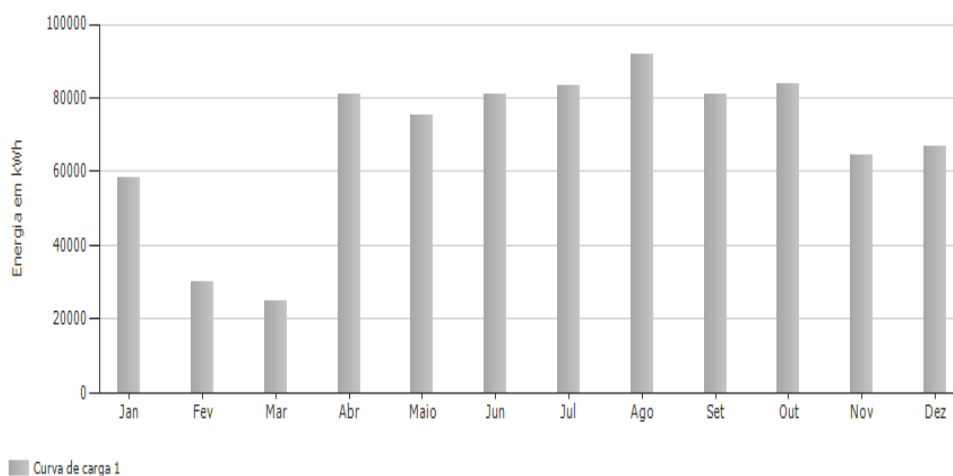


Figura 45 - Consumo mensal de todos PBRs para o ano de 2016.

Foram considerados dois locais para a instalação dos módulos fotovoltaicos, nomeadamente, a cobertura do pavilhão de processamento e uma cobertura para o parque de estacionamento. Para o modelo foram considerados módulos da marca Jinko Solar de 275 Wp. Utilizando a ferramenta de otimização de distanciamento entre módulos instalados, na cobertura do pavilhão de processamento seria possível instalar 122,65 kW_{pico} com uma inclinação de 32° a sul, e 38° na água orientada a norte. A cobertura do parque de estacionamento consistirá numa estrutura metálica onde será possível instalar 81,4 kW_p. No total estarão instalados 204,05 kW_p perfazendo uma área instalada total de 1214,5 m².

Para a execução do modelo foram considerados os seguintes pressupostos:

- Dados climáticos para a localização fabril em estudo, base de dados MeteoSyn
- 4 Inversores Sunny Tripower Core 1
- 2 Inversores Sunny Tripower 10000TL-20
- Perda total nos cabos de 5%
- Preço fixo de compra de energia elétrica de 0,10 €/kWh
- Custo estimado da estrutura metálica para o estacionamento de 20000€
- Preço de instalação de 0,70 €/W_{pico}
- Um valor de 1000€ anuais para manutenção
- Inflação da tarifa de energia de 2% ao ano

Como na descrição dos consumos não estão contabilizados todos os consumos de energia elétrica da unidade fabril, foi assumido um preço de injeção na rede de igual ao preço de compra. Assim, a energia que o *software* apresenta como injetada na rede, deverá ser analisada como sendo energia utilizada para autoconsumo.

A figura 46 apresenta a previsão anual do rendimento da instalação, sendo espectável uma produção próxima da totalidade da energia necessária para a operação dos grupos de eletrobombas em alguns meses (Fevereiro e Março), e para os restantes meses andará entre os 30% a 46%.

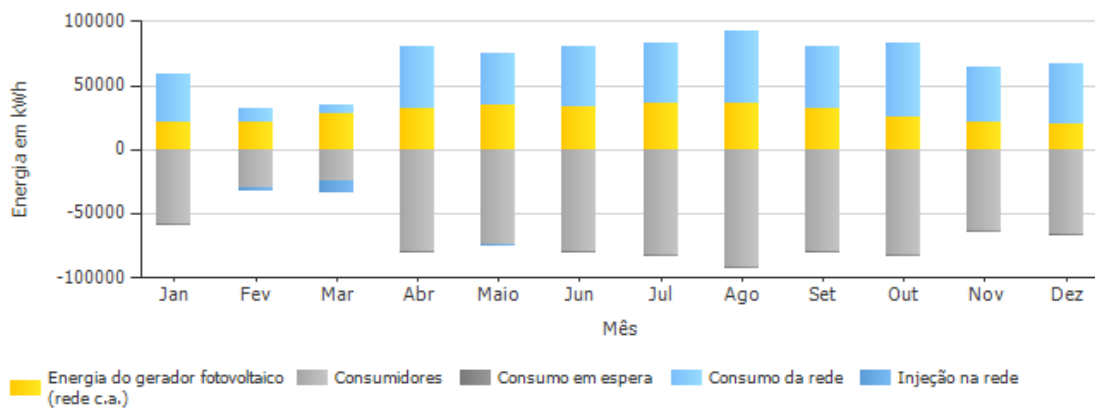


Figura 46 - Previsão anual de rendimento da instalação com consumo.

Este projeto significaria um investimento de 163.990€, apresenta um payback em torno dos 5,1 anos e uma taxa interna de retorno de 20,41%, apresentando ao fim de 20 anos (limite de vida do projeto) um fluxo de caixa acumulado de 525.693,35€.

Assim, é espectável uma produção de energia no primeiro ano de 350 MWh o que resultará numa poupança de energia elétrica de 75,2 tep e consequente redução de emissões de CO₂ em 164,5 tonCO₂.

5.3 Alteração geométrica do sistema com vista à diminuição do sombreamento.

Efetuando uma análise visual macroscópica aos reatores, é visível a heterogeneidade da incidência solar sob a forma de sombreamentos, principalmente quando o reator se encontra em produção a concentrações mais elevadas. Desta forma, procurou-se comparar a configuração existente com três novas configurações ao nível da geometria da zona fótica, reduzindo para metade o número de tubagens com o intuito de aumentar a incidência solar nas zonas interiores mais prejudicadas a esse nível.

5.3.1 Variação da radiação incidente do interior do PBR

Uma vez definidas as geometrias e cenários a testar, simulou-se através de um modelo representativo da configuração do reator no *software* DesignBuilder qual

a variação da radiação incidente ao longo do PBR dependendo da configuração encolhida.

Como podemos observar nas simulações efetuadas para as diferentes alturas do ano e cenários testados, as curvas de radiação incidente obtidas ao longo do reator comportam-se de acordo com uma tendência de variação semelhante, em que a radiação incidente decresce rapidamente desde a linha nº 1 (que se encontra a uma cota superior) até a um determinado momento, mantendo-se relativamente constante após esse valor.

Nas Figura 47, Figura 48 e Figura 49 encontram-se representados os resultados obtidos nas simulações feitas para um dia típico no mês de Julho, Abril e Dezembro, respetivamente. Nestas, é possível observar através das curvas de radiação uma notória variação entre os cenários testados mantendo de uma forma geral a tendência de comportamento já anteriormente referida.

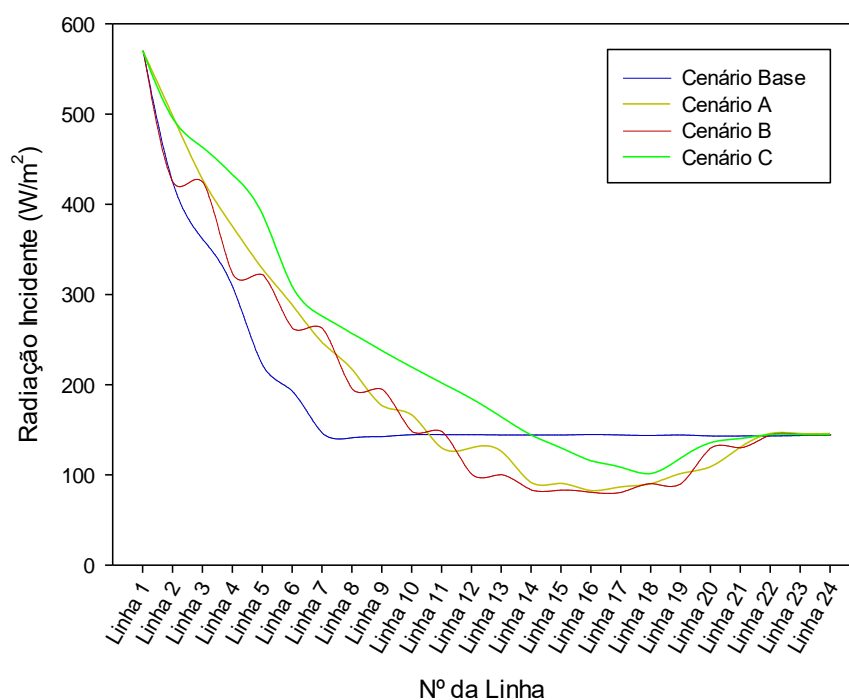


Figura 47 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Julho.

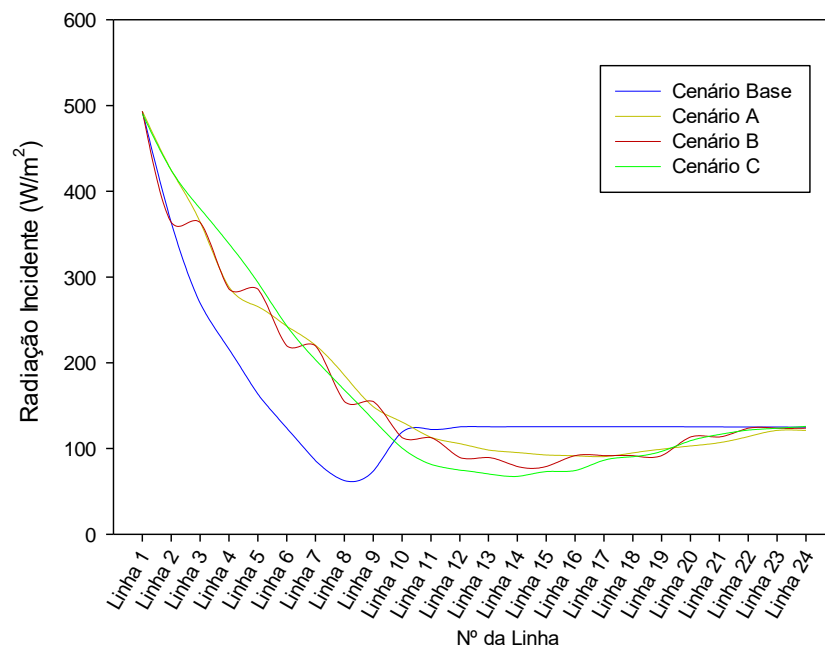


Figura 48 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Abril.

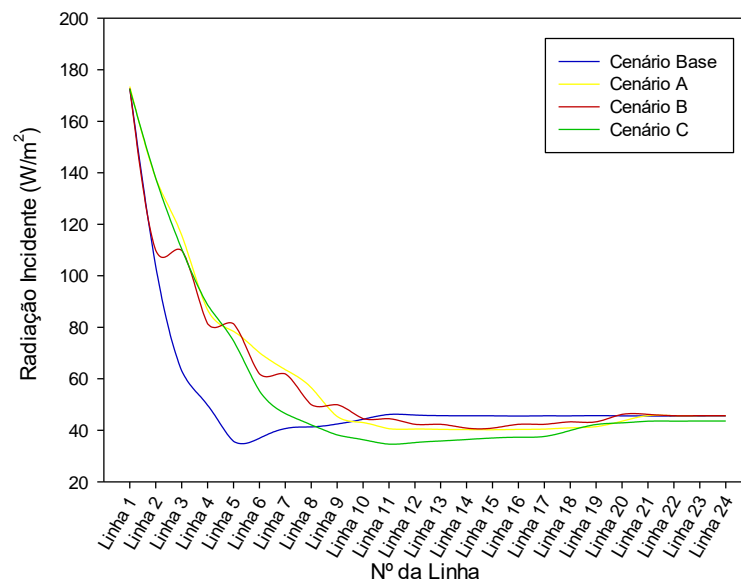


Figura 49 - Comparação da variação da radiação média diária ao longo do PBR para um dia típico de Dezembro.

Como é possível identificar na Figura 50, existe uma variação relativamente ao cenário que apresenta uma radiação incidente média no interior do PBR superior. Para o mês de julho, o cenário C aparece em obvio destaque relativamente aos restantes, sendo que para os restantes meses, abril e dezembro, os resultados obtidos mostram-se bastante próximos embora os novos cenários estudados

estejam um pouco melhor classificados que o cenário base, com o cenário A apresentando melhores resultados.

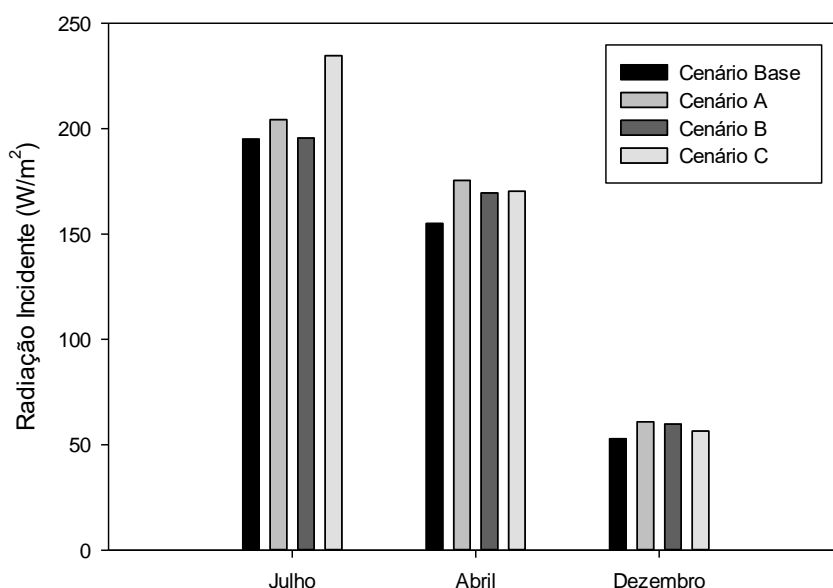


Figura 50 - Variação da radiação média diária ao longo do PBR.

5.3.2 Modelos de previsão de crescimento e Indicadores Energéticos Específicos

Uma vez obtidos os valores de radiação incidente ao longo do fotobiorreator, para cada configuração da zona fótica estudada através do modelo executado no DesignBuilder, procurou-se avaliar qual a influência das variações de distribuição de radiação observadas na produtividade do reator.

Para tal foram utilizados dois modelos de previsão de crescimento distintos: O modelo proposto por Jassby and Platt em 1976, em que a produtividade é obtida através da quantidade de açúcar produzido, variando de acordo com a intensidade luminosa disponível (Equação 1). O modelo de crescimento biológico obtido através da adaptação da equação da cinética de crescimento com a temperatura como fator limitante, pela introdução da equação obtida pelo cruzamento dos dados de temperatura no interior dos reatores e radiação incidente, obtendo-se a equação final (15).

Na seguinte Tabela 5, encontram-se apresentados os resultados obtidos através da aplicação dos modelos referidos anteriormente. Aqui é possível ver o impacto que as alterações na geometria da zona fótica tiveram na produção de biomassa nos dias típicos de operação estudados. É também possível observar uma notória diferença na quantidade de biomassa que é produzida em diferentes alturas do ano, chegando mesmo a haver alturas do ano (Dezembro – Cenário Base e C, segundo a aplicação da Equação 15) em que não se verificam as condições mínimas necessárias para a ocorrência de crescimento biológico.

Tabela 5 – Resultados de previsão de produção de biomassa segundo os modelos abordados.

	Cenário	kg _{Biomassa} dia ⁻¹ m ⁻³	kg _{Biomassa} dia ⁻¹ m ⁻³
		Jassby and Platt	Equação (15)
JULHO	Cenário Base	1,339	0,952
	Cenário A	0,982	0,744
	Cenário B	0,978	0,794
	Cenário C	1,024	0,928
ABRIL	Cenário Base	1,060	0,543
	Cenário A	0,828	0,521
	Cenário B	0,817	0,573
	Cenário C	0,790	0,506
DEZEMBRO	Cenário Base	0,354	*
	Cenário A	0,300	0,013
	Cenário B	0,315	0,019
	Cenário C	0,275	*

*Não é promovido o crescimento biológico.

Em todos os cenários propostos, a produtividade do reator será inferior em comparação com o Cenário Base. No entanto, uma vez reduzida a capacidade volumétrica do reator o caudal de operação será da mesma forma mais baixo e consequentemente os consumos associados aos grupos de bombas serão menores.

Na Tabela 6 encontram-se apresentados os consumos de energia diários espectáveis para cada cenário estudado, considerando um padrão típico de operação ininterrupta durante as horas de incidência solar e arranque dos grupos de bombas durante 5 minutos em cada hora sem incidência solar impedindo a sedimentação da biomassa.

Tabela 6 - Consumo de energia espectável na agitação do sistema.

	Cenário	Caudal p/ Bomba (m ³ /h)	Potência	Potência Total (kW)	Horas De operação diárias	Consumo diário (kWh/dia)
			Consumida p/ Bomba (kW)			
JULHO	Cenário Base	383	9,4	28,2	15,75	444
	Cenário A	192	1,8	5,4	15,75	85
	Cenário B	192	1,8	5,4	15,75	85
	Cenário C	192	1,8	5,4	15,75	85
ABRIL	Cenário Base	383	9,4	28,2	13,00	367
	Cenário A	192	1,8	5,4	13,00	70
	Cenário B	192	1,8	5,4	13,00	70
	Cenário C	192	1,8	5,4	13,00	70
DEZEMBRO	Cenário Base	383	9,4	28,2	10,25	289
	Cenário A	192	1,8	5,4	10,25	55
	Cenário B	192	1,8	5,4	10,25	55
	Cenário C	192	1,8	5,4	10,25	55

Como podemos observar através dos valores apresentados (Tabela 6), os valores de consumo são consideravelmente mais baixos para os cenários propostos comparativamente com o cenário base.

Assim, a melhor forma de avaliarmos efetivamente os resultados dos cenários propostos será através do indicador energético específico kWh/kg_{biomassa}, onde é apresentada a quantidade de energia necessária para produzir um quilo de biomassa em todos os cenários estudados. Uma vez que foram utilizados dois modelos diferentes para a previsão de produtividade, teremos de igual forma dois grupos de indicadores energéticos específicos dependendo do modelo considerado.

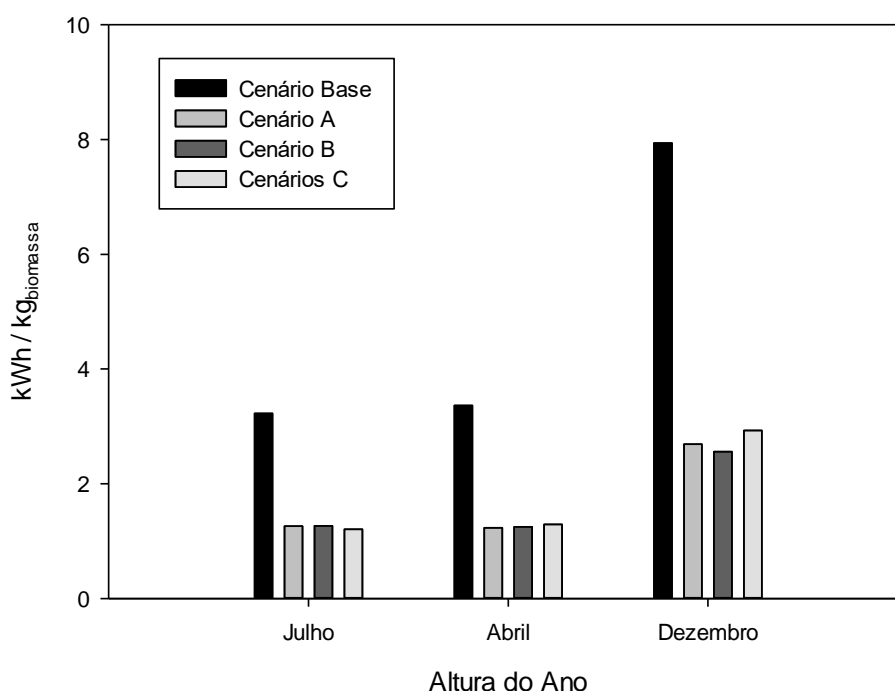


Figura 51 - Indicadores específicos de consumo energético obtidos através da equação de previsão de crescimento proposta por Jassby et al., 1976.

A Figura 51 apresenta uma comparação gráfica entre os indicadores energéticos específicos obtidos através da aplicação do modelo de crescimento proposto por Jassby and Pratt. Como é possível identificar, existe uma variação relativamente ao cenário que apresenta um melhor indicador energético específico conforme o mês de simulação, no entanto, todos os cenários propostos aparecem em óbvio destaque relativamente ao cenário base embora estejam bastantes próximos entre si.

Para o mês de julho, o Cenário C apresenta o indicador específico mais favorável com 1,21 kWh por kg de biomassa produzida. Para o mês de Abril, o Cenário A apresenta o indicador específico mais favorável com um consumo de 1,23 kWh por kg de biomassa produzida. Já para o mês de dezembro, o Cenário B é o que apresenta o indicador específico mais favorável com um consumo de 2,56 kWh por kg de biomassa produzida.

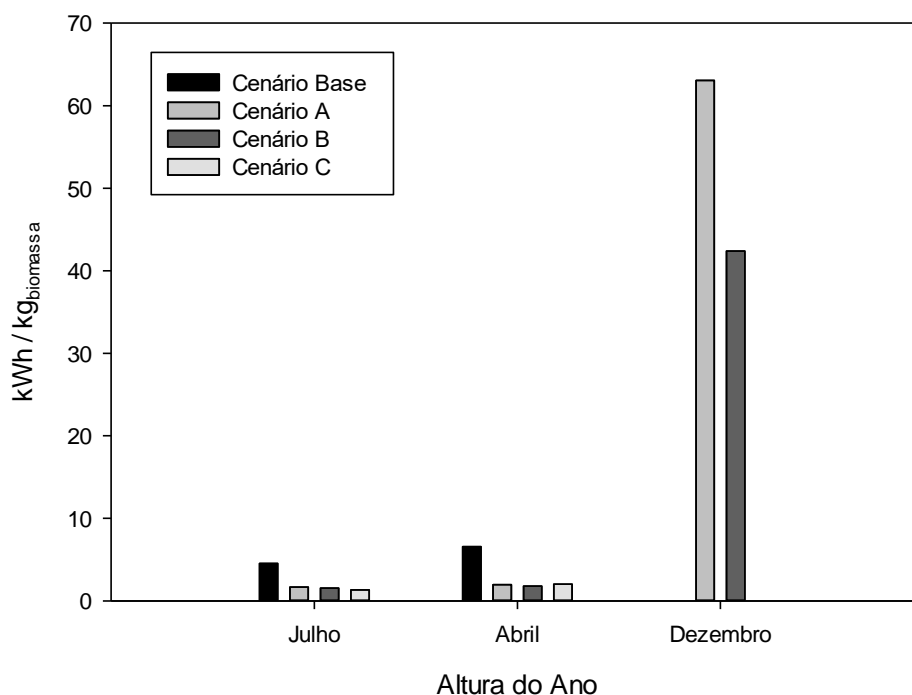


Figura 52 - Indicadores específicos de consumo energético obtidos através da equação (15) de previsão de crescimento.

A Figura 52 apresenta uma comparação gráfica entre os indicadores energéticos específicos obtidos através da aplicação do modelo de crescimento segundo a equação (15). Para os meses de julho e abril os cenários propostos apresentam indicadores bastante inferiores ao Cenário Base.

Para o mês de julho, o Cenário C apresenta o indicador específico mais favorável com 1,33 kWh por kg de biomassa produzida. Já para o mês de Abril, o Cenário B é o que apresenta o indicador específico mais favorável com um consumo de 1,78 kWh por kg de biomassa produzida.

Para o mês de dezembro os resultados são francamente mais desfavoráveis. Para este dia típico, não é possível calcular o indicador específico relativamente ao Cenário Base e Cenário C uma vez que não se encontram reunidas as condições mínimas para a ocorrência de crescimento biológico segundo o modelo utilizado. No entanto, o Cenários B é o que apresenta um indicador específico mais favorável com um consumo de 42,40 kWh por kg de biomassa produzida.

A implementação de qualquer um dos cenários propostos em um fotobiorreator existente seria facilmente executada num espaço temporal de um mês. Numa primeira análise, o projeto de alteração da configuração representaria um investimento inicial de 2770€ com um *payback* entre 2 a 6 meses.

6 Conclusões

Uma vez determinadas as condições hidráulicas reais do circuito relativamente ao caudal necessário de operação, perda de carga do sistema, e estado de funcionamento do grupo de bombas, é possível concluir que as eletrobombas se encontra a operar dentro da sua zona de maior eficiência, estando desta forma bem dimensionadas atendendo às necessidades do reator.

Não foi identificado nenhum possível ganho através da alteração de algum dos elementos hidráulicos presente no circuito, uma vez que o sistema por si só já possui equipamentos de elevada eficiência e a regulação de caudal é feita através de variação eletrónica de velocidade evitando-se pontos de perda de carga desnecessários como válvulas para regulação de caudal.

Assim, foi possível observar o estado de operação dos reatores nesta etapa em que se encontram em operação contínua e validar se os mesmos se encontram a operar em concordância com o que inicialmente foi idealizado na fase de projeto.

Aferiu-se que, com a alteração do grupo de eletrobombas do reator retirando-se uma das bombas passando o sistema a operar com apenas duas bombas instaladas em paralelo, os consumos energéticos seriam mais elevados comparativamente com a configuração inicial. Além do aumento de consumo, deve ser igualmente considerado o custo de investimento inerente à execução de novas tubulações na zona de compressão e ligação aos Coletores de Entrada “H”.

Uma vez que não foi encontrada forma de reduzir os consumos por alteração dos elementos hidráulicos, produzir essa mesma energia ou grande parte dela através de um sistema de autoconsumo fotovoltaico seria uma boa solução ao problema em estudo. Através da implementação desta melhoria, seria espectável uma poupança energética anual de 75,2 tep, resultando numa equivalente redução nas emissões de CO₂ em 164,5 tonCO₂/ano.

Além do estudo da componente hidráulica, foi avaliada igualmente a variação da radiação incidente ao longo do reator, primeiramente através de medições *in situ* e posteriormente através de simulação computacional recorrendo ao software

DesignBuilder. Verificando-se que a curva de variação de radiação incidente, descreve uma tendência de diminuição semelhante em ambos os casos.

Através das simulações realizadas ao nível da configuração da zona fótica, foi possível identificar que em todos os cenários propostos, independentemente do modelo de previsão de crescimento utilizado, ocorre uma melhoria significativa nos indicadores energéticos específicos, variando o melhor cenário consoante a altura do ano e respetiva trajetória solar.

Utilizando o modelo de previsão de crescimento de Jassby and Platt, o Cenário C é o que apresenta um indicador específico mais favorável para o mês de julho, seguindo-se o Cenário A para o mês de abril e, por fim, o Cenário B para o mês de dezembro.

Analisando os resultados obtidos através da utilização do modelo de previsão apresentado na equação 15, o Cenário C é o que apresenta um melhor indicador energético específico para o mês de julho, seguindo-se o Cenário B para os meses de abril e dezembro.

Assim, foi observada concordância nos resultados obtidos através dos dois modelos de previsão de crescimento utilizados, na medida em que para o mês de julho e dezembro a melhor configuração para a zona fótica é a apresentada no cenário C e B, respetivamente. Esta melhoria teria um investimento inicial estimado em 2270€, com um *payback* entre 2 a 6 meses.

Além da melhoria no indicador energético específico, a implementação do cenário de alteração geométrica traria vantagem ao nível da manutenção do reator, uma vez que resultaria numa redução no tempo necessário para limpeza e preparação do mesmo.

Não obstante ao bom estado de funcionamento das eletrobombas, como trabalho futuro, seria benéfica a avaliação dos impactos que teria a implementação de um sistema de agitação de impulsor aberto que permita a introdução no sistema de pequenas partículas poliméricas para aumento da turbulência (mistura) e combate à formação de bio filme nas superfícies da zona fótica.

7 Referências

- Béchet, Q., Shilton, A., & Guieysse, B. (2013). Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1648–1663. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.014>
- Benson, B. C., & Rusch, K. A. (2006). Investigation of the light dynamics and their impact on algal growth rate in a hydraulically integrated serial turbidostat algal reactor (HISTAR). *Aquacultural Engineering*, 35(2), 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.005>
- Bernard, O., & Rémond, B. (2012). Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth. *Bioresource Technology*, 123, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.022>
- Boyd, P. W., Ryneerson, T. A., Armstrong, E. A., Fu, F., Hayashi, K., Hu, Z., ... Thomas, M. K. (2013). Marine Phytoplankton Temperature versus Growth Responses from Polar to Tropical Waters - Outcome of a Scientific Community-Wide Study. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063091>
- Croze, O. a, Sardina, G., Ahmed, M., Bees, M. a, & Brandt, L. (2013). Dispersion of swimming algae in laminar and turbulent channel flows : consequences for photobioreactors Dispersion of swimming algae in laminar and turbulent channel flows : consequences for photobioreactors, (February).
- Elrayies, G. M. (2018). Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(May 2017), 1175–1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>
- Engineering, O. (2016). Differentiating Between Doppler & Transit Time Ultrasonic Flow Meters.
- Janssen, M. (2016). *Microalgal Photosynthesis and Growth in Mass Culture. Photobioreaction Engineering* (1st ed., Vol. 48). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.11.001>

- Jassby, A. D., Platt, T., Limnology, S., Jul, N., Jassbyl, A. D., & Platt, T. (1976). Phytoplankton Mathematical formulation -of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, *21*(4), 540–547.
- Lee, E., Jalalizadeh, M., & Zhang, Q. (2015). Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. *Algal Research*, *12*, 497–512. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.10.004>
- Li, W., Guo, Y., & Fu, K. (2011). Enclosure experiment for influence on algae growth by shading light. *Procedia Environmental Sciences*, *10*(PART B), 1823–1828. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.285>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Rubenstein, D. A., Yin, W., & Frame, M. D. (2012). *Fundamentals of Fluid Mechanics. Biofluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381383-1.00002-3>
- Simionato, D., Basso, S., Giacometti, G. M., & Morosinotto, T. (2013). Optimization of light use efficiency for biofuel production in algae. *Biophysical Chemistry*, *182*, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2013.06.017>
- Singh, R. N., & Sharma, S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 2347–2353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.026>
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015a). Effect of temperature and light on the growth of algae species : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 431–444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015b). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 431–444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- Vasumathi, K. K., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2012). Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 16(7), 5443–5450.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.013>

Vonshak, A., Abeliovich, A., Boussiba, S., Arad, S., & Richmond, A. (1982). Production of spirulina biomass: Effects of environmental factors and population density. *Biomass*, 2(3), 175–185. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(82\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0144-4565(82)90028-2)

Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, 30(4), 904–912. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>

White, F. M. (2013). *Fluid Mechanics*. (I. McGraw-Hill companies, Ed.) (7th ed.).

Hadi, S. C. (2012). *Regression Analysis by Example*, 5th Edition. John Wiley & Sons.

8 Anexos

8.1 Curvas características da bomba segundo o fabricante, variando a velocidade de operação.

